

Н. Г. Федорен, О. Н. Бахмет

# Экологические особенности трансформации соединений углерода и азота в лесных почвах



КАРЕЛЬСКИЙ НАУЧНЫЙ ЦЕНТР  
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК  
ИНСТИТУТ ЛЕСА

KARELIAN RESEARCH CENTRE  
RUSSIAN ACADEMY OF SCIENCES  
FOREST RESEARCH INSTITUTE



**N. Fedorets, O. Bahmet**

**Ecological settings  
of carbohydrate and nitrogen  
transformations  
in forest soils**

**Petrozavodsk  
2003**

**Н. Г. Федорец, О. Н. Бахмет**

**Экологические особенности  
трансформации  
соединений углерода и азота  
в лесных почвах**

**Петрозаводск  
2003**

**УДК 631.461:582.475**

**Федорец Н. Г., Бахмет О. Н. Экологические особенности трансформации соединений углерода и азота в лесных почвах.** Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 2003. 240 с.: ил. 46 (16 на вклейках), табл. 79. Библиогр. 334 назв.

Работа посвящена актуальным вопросам биогеоценологии — круговороту и трансформации органического вещества в лесных биогеоценозах. Особое внимание уделено превращению азотных соединений и их роли в устойчивости и продуктивности лесных насаждений. Впервые обобщены материалы многолетних исследований по данной проблеме, проведенных в Карелии. Рассматриваются факторы формирования почв и почвенного покрова, взаимосвязь почв и типов сосновых и еловых лесов, влияние зональности, экологических условий на запасы органического вещества и азота в почвах и в лесных биогеоценозах в целом. Исследованы состав органического вещества почв, роль почвенной фауны и микробиоты в трансформации растительного опада и формировании органофилия лесных почв. Впервые приводятся материалы по микроморфологии лесных почв Карелии. Подробно представлен количественный и качественный состав азотных соединений в лесных почвах, их пространственная и временная изменчивость, а также факторы, ее определяющие. Показано, что основные запасы азота приурочены к почвенному гумусу. Балансовые модели круговорота азотных соединений в лесных биогеоценозах выявили напряженность азотного режима почв в северных условиях. Изучено воздействие антропогенных факторов на азотный режим лесных почв и показано, что изменение состава различных форм азотных соединений в почвах возможно лишь при коренной смене фитоценоза. Монография может быть полезна для специалистов почвоведов, лесоводов, экологов, преподавателей и студентов вузов.

The volume deals with topical problems of biogeocenology — organic matter cycle and transformations in forest ecosystems. We focused on nitrogen transformations and their role in forest stability and productivity. The data obtained during years of research into the problem in Karelia are generalised. The monograph considers the soil- and soil cover formation factors, presents information about the relationships between soils and types of pine and spruce forests, the influence of zonality and ecological conditions on organic matter and nitrogen stores both in the soils, and in forest ecosystems at large. Much attention is paid to the composition of the soil organic matter, to the role of the soil fauna and microbial biota in the die-back degradation and formation of the forest soil organic profile. Data on the micromorphology of forest soils in Karelia are presented for the first time. A detailed account is given of the qualitative and quantitative composition of nitrogen compounds in forest soils, their spatial and temporal variability, as well as the factors it is determined by. We show that nitrogen stores are mostly confined to the humus horizon. The models of nitrogen balance cycles in forest ecosystems indicate a stressful nitrogen regime in soils in the north, as proved experimentally. Much consideration is given to anthropogenic impacts on the nitrogen regime in forest soils, with the conclusion that the ratio of various nitrogen compounds in the soils can change only if the plant cenosis is virtually replaced. The monograph may prove useful to experts in soil science, silviculture, ecology, to university professors and students.

**Отв. редактор — член-корр. РАН, профессор С. А. Шоба**

**Рецензенты — Р. М. Морозова, А. М. Володин**

*Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (гранты 02-04-06199, 03-04-48014), ФЦП «Интеграция науки и высшего образования России на 2002–2006 гг.» (грант № ЭО142/819).*

**ISBN 5-9274-0113-9**

**© Карельский научный центр РАН, 2003**

## Введение

Одной из важнейших проблем современности является проблема воспроизводства и охраны бореальных лесов, особенно в тех районах, где происходит быстрое снижение лесопокрытых площадей. Продуктивность насаждений зависит от почвенного плодородия, поэтому в комплексе мероприятий, направленных на решение данной проблемы, важное место отводится улучшению почвенных условий. Наряду с гидротермическими факторами, производительность древесных насаждений обусловлена режимом питания, который в значительной степени определяется качественным составом органического вещества почв, а также его количеством. Установлено, что для развития лесной растительности на Европейском Севере основными являются условия азотного питания. Изучение потребности древостоев в азоте, качественного и количественного состава его соединений в почве, а также их превращения из одних форм в другие имеет общебиологическое и практическое значение. В различных природных зонах экологические факторы, обуславливающие направленность и интенсивность процессов преобразования азотсодержащих соединений, неодинаковы, поэтому изучение превращения и накопления органического вещества и азота в зональном аспекте и в различных типах почв представляет несомненный интерес. Круговороты углерода и азота тесно взаимосвязаны, эти элементы являются определяющими для существования всех живых организмов.

Интенсивное освоение лесных богатств сопровождается возрастанием антропогенной нагрузки, нарушающей динамическое равновесие в биогеоценозах. В результате изменяется характер взаимодействия между почвой и растительностью, влияя на почвообразование. Воздействия на почву разнообразны — это лесохозяйственные мероприятия и техногенные нагрузки. Решение проблемы охраны почв и повышения их плодородия невозможно без знания изменения почвенных свойств и процессов, вызванных антропогенным воздействием. Очень важно не допустить потерь азота и снижения уровня его содержания в почвах.

Все сказанное свидетельствует о необходимости изучения состава и условий преобразования азотсодержащих веществ, определения размеров поступления азота в почву, а также количественной оценки значимости азота в различных биогеоценозах.

В северо- и среднетаежной подзонах Восточной Фенноскандии исследованы закономерности накопления, динамики и трансформации соединений углерода и азота в основных типах лесных почв. Установлены особенности воздействия ведущих факторов почвообразования на параметры азотного режима почв. Показано, что в зональном, временном и экологическом аспектах азотный фонд лесных почв характеризуется высокой стабильностью. Выявлены оптимальные экологические условия деградации органических веществ и обогащения почв подвижным азотом.

Созданы концептуально-балансовые модели биологического круговорота азота в лесных биогеоценозах северной и среднетаежной подзон, позволившие выявить особенности их функционирования в зависимости от возраста древостоя, породного состава и хозяйственного воздействия. Определены запасы азота в растительных и почвенных блоках, величины его приращения и убыли в годичном цикле, а также интенсивность перемещения азотных соединений между блоками. Показано, что поступление азота в биогеоценозы и потери его уравновешены, процессы превращения азотных соединений осуществляются, в основном, в системе растения — почва. Все исследованные биогеоценозы характеризуются высокой экологической устойчивостью.

Под воздействием лесохозяйственных мероприятий (рубки различной интенсивности, минеральные удобрения) строение азотного фонда мезоморфных почв изменяется слабо.

Выявлена четкая корреляция между количеством и качеством органического вещества почв и продуктивностью древостоев. Установлена тесная прямая зависимость ежегодного прироста фитомассы сосновых и еловых древостоев от запасов валового и лабильного азота в корнеобитаемом слое автоморфных почв. Для сосняков эта зависимость более тесная, чем для ельников.

Дана оценка воздействия лесохозяйственных мероприятий и антропогенного загрязнения на состав органического вещества и азотный режим почв.



## **Глава 1**

# **РОЛЬ СОЕДИНЕНИЙ УГЛЕРОДА И АЗОТА В ФОРМИРОВАНИИ ПРОДУКТИВНОСТИ ЛЕСНЫХ БИОГЕОЦЕНОЗОВ**

### **1.1. Поступление соединений углерода и азота в биогеоценозы**

Связывание углерода растениями в процессе фотосинтеза является наиболее важным для существования биосферы. Роль почвы в лесных экосистемах определяется в значительной степени ее органическими соединениями. Соединения углерода во многом обуславливают формирование почвы. Органическое вещество почв является источником энергии для почвенных организмов, которые, в свою очередь взаимодействуя с минеральной частью почвы, формируют ее структуру. Углерод в почве играет большую роль в круговороте питательных элементов. Следовательно, количество и качество органического вещества почвы отражают и определяют ее формирование и, соответственно, продуктивность лесных экосистем.

Азот является незаменимым элементом для функционирования всех организмов. Он входит в состав белков, выполняющих ферментативные функции в процессе обмена веществ, и нуклеиновых кислот, служащих носителями наследственной информации у всех живых организмов. Классическими работами агрохимиков и физиологов растений, начиная с Буссенго во Франции и заканчивая Прянишниковым в России, блестяще выявлена исключительная роль азота в жизни растений (Тюрин, 1965).

Условия азотного питания определяют продуктивность древостоев на Европейском Севере. Известно, что ель и сосна из всех питательных элементов больше всех потребляют азота (Ремезов, 1941). Поэтому несомненно обоснованным является отнесение обеспеченности азотом, наряду с водой и теплом, к важнейшим экологическим факторам. От нее зависит состав и численность гетеротрофных компонентов, средообразующее воздействие авто- и гетеротрофов и вызываемые в связи с этим изменения в биогеоценозах (Работнов, 1980). Изучение поступления азота в лесные биогеоценозы и превращение его соединений имеет немаловажное значение для поиска путей создания высокоэффективных древостоев.



Запас азота в биогеоценозах в незначительной степени сформировался за счет его содержания в почвообразующей породе, но основное его количество накопилось в процессе развития биогеоценозов. Главный источник поступления азота в биогеоценозы — атмосфера. С атмосферными осадками обычно поступает небольшое количество азота, иногда  $1-2 \text{ кг} \cdot \text{га}^{-1}$  и не больше  $5-10 \text{ кг} \cdot \text{га}^{-1}$  (Работнов, 1980). В европейской части России, если нет промышленного загрязнения, то с осадками поступает  $4-10 \text{ кг} \cdot \text{га}^{-1}$  азота (Бобрицкая, 1962; Селезнев, Дроздова, 1966; Захарченко, 1971; Юшкевич и др., 1971; и др.), в том числе за вегетационный период — около 60%, в основном в аммиачной форме (Попова, 1983; Шилова, Банкина, 1994). Этого количества азота, как отмечал И. В. Тюрин (1965), часто недостаточно для нормального роста и развития растений.

Многие исследователи указывали на возможность пополнения азота в почве биологическим путем. О значимости биологической фиксации азота говорили еще М. Е. Ткаченко (1922) и Д. Н. Прянишников (1945), которые считали азотфиксацию одним из путей поступления азота в лесную почву. Общеизвестно, что растения не могут усваивать молекулярный азот атмосферы. Фиксация азота атмосферы и перевод молекулярного азота в связанную форму осуществляются в процессе биологической азотфиксации почвенными микроорганизмами. Связывание молекулярного азота могут осуществлять только прокариотные бактериальные микроорганизмы, относящиеся к разным таксономическим группам. Одни из них фиксируют азот самостоятельно и получили название свободно живущих азотфиксаторов. Симбиотические азотфиксаторы проникают в корневую систему растений и образуют на корнях специальные образования — клубеньки. Активность несимбиотической азотфиксации значительно ниже, чем у симбиотических систем. По оценкам разных авторов, активность азотфиксации сильно варьирует в различных растительных сообществах и составляет  $5-25 \text{ кг} \cdot \text{га}^{-1}$  под зерновыми культурами,  $15-30 \text{ кг} \cdot \text{га}^{-1}$  в луговых и степных сообществах, в лесных экосистемах в среднем составляет  $10 \text{ кг}$  азота на  $1 \text{ га}$  за год. При благоприятных условиях температуры, влажности и pH почвы показатели активности несимбиотической азотфиксации могут достигать достаточно высоких величин (Моого, 1966).

Исследования, проведенные лабораторией лесоведения АН РАН (Азотфиксация..., 1987), показали, что биологическая фиксация азота атмосферы играет важную роль в поддержании плодородия почв лесных биогеоценозов. В песчаных почвах сосняков Подмосковья азотфиксация составляет в среднем около  $15 \text{ кг N}_2$  на  $1 \text{ га}$  за сезон. В дерново-подзолистых почвах в высокопродуктивных ельниках южной

тайги может быть фиксированно до 22 кг N<sub>2</sub> на 1 га за сезон. По данным U. Granhall, T. Lindberg (1978), в почвах сосняков и ельников Швеции интенсивность биологической азотфиксации составляет соответственно 0,35 и 3,2 кг · га<sup>-1</sup> в год. По данным ряда авторов, интенсивность азотфиксации в лесных подзолистых почвах северной тайги (Кольский полуостров) крайне низкая и составляет 0,5–1,0 кг N<sub>2</sub> на 1 га в год (Егоров, 1979; Егорова, Каминская, 1980). Таким образом, ежегодное поступление азота из атмосферы в лесные биогеоценозы Европейского Севера составляет в среднем 0,5–5,0 кг · га<sup>-1</sup> в год (Lek et al., 1996).

### **1.2. Превращение соединений углерода и азота в лесных насаждениях**

Изучение круговорота веществ в системе почва — растение в лесоводстве проводилось еще в конце XIX века, и в результате утвердилось мнение, что древесные породы мало нуждаются в дополнительном азоте. Основой для такого заключения послужили данные о небольшом содержании азота в ежегодном приросте древесных пород и возвращении значительного количества азотных соединений в почву с опадом. Только после принятия в 1950–1960-х годах Международной биологической программы (МБП) во многих странах развернулись обширные исследования круговорота органического вещества и элементов минерального питания в различных ценозах. Обобщение исследований по круговороту веществ в лесных ценозах было сделано в 1965 г. (Родин, Базилевич, 1965), а конкретно для таежной зоны — в 1971 г. (Базилевич, Родин, 1971). В большинстве работ имеются данные по общей фитомассе, годичной продукции фитомассы и содержанию в ней углерода и азота. При оценке круговорота углерода и азота в лесах широко используется такой показатель, как общая фитомасса и содержание в ней этих элементов, по величине которых судят о продуктивности биогеоценоза. Этот показатель колеблется в зависимости от возраста насаждения, состава древостоя и условий местопроизрастания. Например, ельник 100-летнего возраста имеет фитомассу 315 т · га<sup>-1</sup> с содержанием 108,6 т углерода и 477 кг азота, березняк и осинник в возрасте 50–60 лет при фитомассе 275 и 251 т · га<sup>-1</sup> содержат соответственно 914 и 953 кг · га<sup>-1</sup> азота (Ремезов, 1956). В разных странах для лесных биогеоценозов получены аналогичные данные. В целом в биогеоценозах колебание содержания азота (живые органы растений, опад, подстилка, почва) составляет 1600–23000 кг · га<sup>-1</sup> (Работнов, 1980); в еловых лесах Швеции — 3020–23000 (Tamm, 1975), Англии — 7500 (Ovington, 1965); в сосновых лесах Швеции — 1600–1800 (Tamm, 1975), Англии — 7900 (Ovington, 1965).

Количество углерода и азота, выносимое ежегодно растениями на построение своего прироста, колеблется в широких пределах и зависит от возраста, состава и местопрорастания.

При оценке круговорота используется такой показатель, как количество азота, необходимое для формирования единицы массы сухого вещества. Эвальд (цит. по: Шумаков, Федорова, 1970) определил, что в лесных насаждениях на 1 кг сухого вещества приходится 4–7 кг азота, но этот показатель может возрастать до 13 кг. Изучая круговорот органического вещества и азота, Н. П. Ремезов пришел к выводу, что лесная растительность не обедняет почву азотом, а напротив, в лесной подстилке аккумулируются азот и некоторые другие элементы (Ремезов, 1956). Доля участия различных частей растений в общем выносе азота из почвы различна. По этому вопросу имеется обширная литература. Наиболее высокое содержание азота наблюдается в листьях деревьев и травах, меньше азота в хвое сосны и ели, еще меньше — в древесине. В листьях березы и осины содержится 2–2,5% азота, в хвое сосны и ели — 1,0–1,5%, в древесине — 0,1–0,2% азота. В круговороте азота в лесу принимает участие и травяно-кустарничковый ярус, содержание азота в надземной фитомассе которого колеблется от 2 до 4 кг · га<sup>-1</sup> (Паршевников, 1962; Казимиров и др., 1978). В живых органах растений обычно содержится не более 10% от общего содержания связанного азота в биогеоценозах. Значительная часть азота, накопленного растениями в фитомассе за период вегетации, возвращается в почву с опадом. Масса опада в большей степени зависит от насаждений и условий произрастания, чем от возраста. Например, в березняках 30 и 80 лет масса опада примерно одинакова (Miller, 1974). С опадом возвращается примерно одна треть общего количества азота, потребляемого растениями за период вегетации. По данным ряда авторов, в таежных лесах с опадом возвращается от 20 до 50 кг N в год (Паршевников, 1962; Казимиров и др., 1972).

Наряду с поступлением азота в лесные биогеоценозы, происходят и постоянные потери его из почвы: в результате вымывания водами и в газообразной форме вследствие жизнедеятельности некоторых групп микроорганизмов. Рядом авторов установлено, что потери с внутрипочвенным стоком, как правило, невелики (не более 4–5 кг N в год) (Най, Тинкер, 1980). Нитратный азот теряется в больших количествах, чем аммонийный. Имеются сведения о газообразных потерях азота из лесных почв в результате процесса денитрификации (Куракова, Умаров, 1984; Кутузова, 1984). Денитрификация может происходить в слабо аэрируемых почвах, а также в ризосферах растений. Вопрос о величинах потерь аммонийного азота в газообразной форме из лесной почвы остается дискуссионным.

В настоящее время в связи с исследованием биосферной роли лесов, их продуктивности и устойчивости на фоне глобального изменения климата вновь возрос интерес к изучению круговорота азота в лесах. Учет круговорота веществ в отдельных блоках пока что весьма приблизителен. В качестве методической основы изучения круговорота веществ в биогеоценозах широко используется системный подход и построение концептуально-балансовых моделей. Подобная система описания ценоза используется для того, чтобы объективным образом прогнозировать судьбу ценоза, оценивать те или иные приемы вмешательства в ценоз и подбирать такие из них, которые будут благоприятны как для развития биогеоценоза, так и для его практической деятельности (Ляпунов, Титлянова, 1971; Гильманов, Базилевич, 1983). Работы в области экологии свидетельствуют о том, что системный подход является наиболее адекватным методом изучения структуры и функционирования экосистем.

Для описания экосистем выделяются компоненты (растения, животные, почвы и т. д.) и устанавливаются между ними потоки переноса вещества, энергии или информационные связи. Также выявляются связи экосистемы с внешними объектами — атмосферой, подземными водами и т. п. Концептуально-балансовые модели представляют собой графическое или табличное изображение набора компонентов и связывающих их потоков с количественными характеристиками. Круговорот азота является наиболее сложным среди круговоротов химических элементов. Азот участвует во всех процессах синтеза и деструкции органических веществ, а также имеет собственный микробиологический цикл поступления из атмосферы в почву, превращения из органических форм в минеральные и выделения из почвы в атмосферу. Детальная схема круговорота азота с включением процессов микробиологической трансформации его соединений отличается даже на качественном уровне большой сложностью и различной степенью изученности ее отдельных звеньев. Внутренний цикл включает в себя поглощение азота из фонда его минеральных соединений растительностью, переход при отмирании различных живых организмов в мортмассу, переработку ее и гумуса почвы микроорганизмами, минерализацию азотсодержащих органических соединений до минеральных форм, гумификацию. Внешний азотный цикл представляет собой совокупность процессов поступления азота в биогеоценоз из атмосферы с осадками и пылью, вследствие процесса азотфиксации, а также потерь азота при вымывании в нижележащие горизонты из корнеобитаемого слоя и за счет газообразного выделения (Базилевич, 1979, 1981).

С позиций системного подхода была построена серия концептуальных балансовых моделей обменных процессов ряда природных экосистем — травяных, лесных, пустынных (Ляпунов, Титлянова, 1971; Титлянова, Базилевич, 1975; Базилевич, 1976, 1981). Концептуальные балансовые модели являются первым этапом интеграции эмпирических материалов, главным образом различных стационарных наблюдений: почвенных, гидрологических, а также параметров биологической продуктивности и биологического круговорота веществ между атмосферой, растениями и почвой.

Одной из основных научных предпосылок решения проблемы глобального цикла азота в биосфере является детальное количественное изучение круговорота азота в основных типах экосистем.

### 1.3. Трансформация соединений углерода и азота в лесных почвах

Содержание общего органического углерода в минеральных почвах варьирует от 10 000 до 100 000 мг · кг<sup>-1</sup> и более. Это соответствует запасам 20–200 т углерода в верхней 20-сантиметровой толще почвы с плотностью 1 г · см<sup>-3</sup>. Однако количество активного органического углерода, т. е. находящегося в растворе или в доступной для растений форме, составляет 10–100 мг · кг<sup>-1</sup>. Таким образом, «активный» углерод составляет менее 1% от общего. Запасы общего азота в лесных почвах невелики, за исключением избыточно увлажненных почв. По данным И. В. Тюрина (1965), в слое 0–100 см подзолистых почв хвойных лесов содержится 5,7, дерново-подзолистых почв лиственных лесов — 9,7, болотных низинных — 59,0, переходных — 37,4, верховых — 9,0 т · га<sup>-1</sup> азота.

Известно, что валовой азот в почвах тесно связан с органическим веществом. Отношение С : N указывает на содержание азота в гумусе. Чем больше азота, тем уже отношение С : N, тем значительно быстрее идет минерализация. Это в наибольшей степени относится к свежему, слабо трансформированному органическому веществу. При отношениях С : N, равных 25 и выше, минерализация проходит медленнее, и потому продуцируется только небольшое количество минерального азота. Когда скорость минерализации увеличивается, отношение С : N снижается. Оптимальной признана величина, равная 10 (Дюшофур, 1970).

Важным звеном в сложной цепи факторов, определяющих производительность почв, является обеспеченность растительности усвояемыми формами азота (Ремезов, 1938). Несмотря на то что в лесных насаждениях значительная часть азота, полученная растениями из почвы, ежегодно возвращается с растительным опадом (Ремезов



и др., 1959; Родин, Базилевич, 1965), древесные растения часто испытывают его недостаток. Это обусловлено недоступностью органических соединений азота высшим растениям без предварительной его минерализации. В связи с этим большое значение имеют процессы минерализации органического вещества, способствующие переходу недоступных органических соединений в доступные для растений формы. Весомый вклад в изучение режима азотного питания лесных насаждений внесли исследования Н. П. Ремезова (1938, 1941), В. С. Шумакова (1948, 1958, 1974), W. Wittich (1958), А. Я. Орлова, С. П. Кошелькова (1971), Т. А. Работнова (1980), В. С. Победова (1981), B. N. Ellert, E. G. Gregorich (1996) и многих других. Они отмечают, что минерализация органического вещества зависит от интенсивности биохимических процессов, протекающих в почве, которые, в свою очередь, теснейшим образом связаны с гидротермическими условиями. Большинство лесных почв бедны элементами минерального питания и не обеспечивают ими в достаточной мере произрастающие на них насаждения. Об этом говорят многочисленные опыты с удобрениями. При их внесении почвенное питание улучшается, что в конечном итоге приводит к увеличению прироста деревьев.

В составе азотного фонда почв преобладают органические азотсодержащие соединения (95–99%), а минеральные составляют 1–5%. Минеральный азот в хвойных лесах Севера представлен, главным образом, аммиачной формой. Превращение органических остатков идет, в основном, до стадии аммиака, что обусловлено особенностями гидротермического режима почв, реакцией почвенного раствора и интенсивностью биохимических процессов.

В науке накоплен сравнительно большой фактический материал по формам азота в почве. Исследования, проведенные в различных регионах (Роговой, 1966; Арефьева, 1968; Забелло, 1968; Переверзев и др., 1970; Победов, Волчков, 1972; Вайчис, 1975; Кислых, 1975; Попова, 1983; Переверзев, 1985), показали, что независимо от географического района подвижные соединения азота (минеральный и гидролизуемый) составляют незначительную часть азотного фонда лесных почв, а преобладающей фракцией является негидролизуемый азот, представленный устойчивыми органическими соединениями, недоступными для растений. Значительное внимание этому вопросу уделялось в Канаде, Германии, Скандинавских странах (Tamm, 1962, 1966, 1969; Höhne, Fiedler, 1967; Viro, 1967, 1972; Ovington, 1972; Ellert, Bettany, 1995). Исследования проводились, в основном, в связи с разработкой стратегии применения минеральных удобрений в лесу. Затем интерес к изучению азотного режима лесных почв несколько уменьшился, в то время как на сельскохозяйственных объектах продолжалось интенсивное его

изучение, обусловленное проблемой охраны окружающей среды при избыточном внесении минеральных азотных удобрений и разработкой экологически чистых технологий (Benzing-Purdie et al., 1983; Кудеяров, Кузнецова, 1990; Евдокимов, 1992; Кудеяров и др., 1992; Семенов и др., 1992; Васильева, 1993; Котева, 1993; Kniker, 1993; Kniker et al., 1993, 2000; Kniker, Lüdemann, 1995).

Формы азотных соединений почв, используемых в сельском хозяйстве, изучены значительно лучше, чем лесных (Тюрин, Кононова, 1935; Bremner, 1949; Cornfield, 1960; Болотина, 1961; Шконде, 1971; Турчин, 1972). Лесные почвы имеют ряд особенностей, отличающих их от соответствующих типов почв, занятых сельскохозяйственными угодьями. Они беднее основаниями, имеют более низкую величину рН почвенного раствора, что обуславливает некоторую специфику их режимов. В настоящее время установлены зависимости между содержанием той или иной формы азота в почве (содержание минерального азота, нитрификационная способность, содержание щелочногидролизуемого азота по Корнфилду, легкогидролизуемого – по Тюрину и Кононовой) и урожаем сельскохозяйственных культур.

Вопрос использования данных почвенных анализов в лесном хозяйстве для установления потребностей лесных насаждений в элементах азотного питания остается не до конца решенным. Зависимость между содержанием минерального азота и продуктивностью древостоев прослеживается не всегда. Некоторые авторы указывают на прямую зависимость между содержанием подвижных азотных соединений в почве и ростом насаждений (Судницына, 1965; Морозова, 1967; Победов, 1981), в других же исследованиях такой корреляции не выявлено (Кошельков, 1970). В ряде работ показана зависимость продуктивности древостоев от содержания и запасов валового азота в почве (Абатуров, 1961; Победов, Волчков, 1972; Вайчис, 1975). По данным С. П. Кошелькова (1970), запасы общего азота в корнеобитаемом слое почвы коррелируют с продуктивностью древостоев, но только в той части экологического ряда, где нет других факторов, ограничивающих рост леса (главным образом избыточного увлажнения).

Некоторые исследователи для установления обеспеченности насаждений азотом используют показатель содержания валового азота в лесной подстилке (Wehrmann, 1963; Казимиров и др., 1974б) или метод листовой диагностики.

Несмотря на значительный объем проведенных исследований, лесное хозяйство в настоящее время не имеет достаточно надежных показателей обеспеченности насаждений подвижными формами азотных соединений в почве. Необходимо дальнейшее изучение содержания



и динамики доступного для питания растений азота в лесных почвах, накопление данных об их потенциальном плодородии с учетом специфики строения профиля лесных почв применительно к определенным географическим районам. Исключительно важным является вопрос о химическом составе азотных соединений органического вещества почв, особенно его трудногидролизуемой фракции, поскольку именно здесь заключено основное количество почвенного азота, долгое время остающегося недоступным для питания растений.

### **1.4. Влияние лесохозяйственных мероприятий на трансформацию соединений азота в почве**

Неуклонно растущие потребности в древесине требовали повышения производительности древостоев, что возможно при улучшении плодородия лесных почв. В связи с этим в насаждениях широкое применение получили минеральные удобрения, в первую очередь азотные. Так, во многих странах Европы азотные удобрения применяются давно и дают высокий экономический эффект (Nöhne, Fiedler, 1967; Viro, 1967, 1972; Hoffmann, 1968; Holmen, 1968). В нашей стране минеральные удобрения в лесном хозяйстве применяются в основном в питомниках и значительно реже — в молодых насаждениях. Для обеспечения благоприятного режима питания саженцев сосны и других пород разработаны рекомендации (Стратонович и др., 1962; Победов и др., 1970, 1972), базирующиеся на изучении связи роста растений с почвенными условиями. Для естественных лесов пока нет достаточно надежных данных для широкого применения удобрений, так как оценка плодородия почв по признакам самих почв затруднительна. Чаще всего для установления потребности насаждений в азотных удобрениях используют метод листового анализа. Однако, показывая недостаток снабжения древостоев азотом, данный метод не может вскрыть причину этого недостатка. Поэтому для научного обоснования применения удобрений необходим комплексный подход к проблеме, т. е. изучение содержания и динамики различных форм азотных соединений в почве. Кроме того, успешное применение удобрений в одном районе не может служить гарантией столь же успешного применения их в другом.

Наиболее широко минеральные удобрения в лесных насаждениях применяются в Скандинавских странах. В 1960-е годы Швеция и Финляндия заняли ведущее положение по применению удобрений в лесном хозяйстве (Baule, 1975). Установлено, что минеральные почвы Швеции нуждаются только в азоте, но длительное его применение со временем может привести к недостатку других элементов питания

(Holmen, 1968). Автор отмечает, что мочеви́на является худшим источником азота, чем селитра, особенно на малоплодородных почвах, где гумус биологически мало активен. С. О. Tamm, А. Nilsson, G. Wiklander (1974) показали, что азотные удобрения способствуют увеличению концентрации азота в хвое сосны и увеличению площади поперечного сечения ствола деревьев. По данным S. Svenson (1966), С. О. Tamm (1962), двукратное внесение азота способствует повышению прироста средневозрастных насаждений сосны на песчаных почвах на 20–40% в продолжение пяти лет, прибавки прироста начинаются через год после внесения удобрений, достигая кульминации через 3 года, и прекращаются через 6–7 лет. В условиях Швеции наиболее эффективным является удобрение спелых лесов за 10–15 лет до рубки.

В Финляндии азотные удобрения также находят широкое применение (Viro, 1967). Только азот оказывает существенное влияние на увеличение прироста насаждений на минеральных почвах умеренной производительности (Salonen, 1967; Keipi, Kekkonen, 1970; Mälkönen, 1991). В Финляндии принято считать, что в насаждениях, выращиваемых для получения пиловочной древесины, азотные удобрения всегда рентабельны. В еловых насаждениях высших бонитетов более эффективны фосфорные удобрения. По данным J. Viro (1962, 1972), в сосновых лесах азотные удобрения оправдывают себя лишь на бедных минеральных почвах, обеспечивая прибавку прироста по высоте и объему. В лучших местообитаниях действие азота менее значительно. Необходимо строго дифференцировать подход к оценке эффективности удобрений в разных экологических условиях.

В нашей стране в 1970-е годы во многих районах были развернуты широкие опытные работы по применению удобрений в лесу. Установлено, что в первую очередь нуждаются в азоте и хорошо отзываются на внесение азотных удобрений сосновые насаждения на песчаных почвах (Сляднев, 1968, 1971; Победов, Волчков, 1969; Куликова, 1973; Казимиров и др., 1974а; Сациеникс, Капост, 1975). Изучению теоретических и практических вопросов применения удобрений в лесу, а также методам диагностики минерального питания лесных насаждений посвящены работы В. С. Шумакова, Е. Л. Федоровой (1970), Н. И. Казимирова и др. (1972), В. С. Победова и др. (1977).

Первые опытные работы по применению удобрений на лесных почвах Карелии начаты Институтом леса Карельского филиала АН СССР в 1965 г. Изучали влияние различных доз, видов и сроков внесения удобрений на лесорастительные свойства почв и продуктивность еловых и сосновых древостоев. Было установлено, что под влиянием удобрений усилилось накопление азота, фосфора и калия в хвое и побегах сосны и ели. Повышение уровня минерального питания положительно

отражается на росте деревьев, продуктивности хвои, продолжительности вегетации растений и общем приросте древесины и всей фитомассы. Наибольший эффект отмечается при внесении азотных удобрений. Под влиянием азотных удобрений изменяются физико-химические свойства почвы: кислотность, содержание доступных элементов питания, происходит накопление в почве подвижного азота, а также его гидролизуемых форм в верхних почвенных горизонтах, повышается эффективное плодородие подзолистых почв (Казимиров и др., 1972, 1974а, б; Куликова, 1975).

Таким образом, изучению лесоводственной эффективности использования удобрений посвящено значительное число исследований. Разработаны приемы использования удобрений, дозы и сроки их внесения. В Швеции и Финляндии, где накоплен большой опыт по применению минеральных удобрений в насаждениях, большое внимание уделяется экологической эффективности их использования. Составлены модели с целью прогнозирования влияния удобрений на рост деревьев и динамику этого процесса во времени (Pettersson, 1994а, б). Однако до сих пор менее изученным останется вопрос о влиянии удобрений на свойства лесных почв, а именно, на их азотный фонд. Рациональное использование азотных удобрений как средства улучшения азотного питания растений невозможно без всестороннего исследования трансформации азотных соединений в сложной системе почва — удобрение — растение (Сапожников, 1973).

Большое значение азотных удобрений в повышении производительности древостоев обязывает разрабатывать такие приемы и методы их использования, которые могли бы обеспечить достижение наибольшего коэффициента полезного действия азота. Благодаря применению изотопа  $N^{15}$  удалось подробно проследить за процессами взаимодействия удобрений с почвой. Установлено, что под влиянием азотных удобрений усиливается минерализация органического азота почвы, удалось определить степень использования растениями азота удобрений и азота самой почвы (Турчин, 1956, 1964, 1965, 1972; Кореньков, 1968; Кудряков, 1969; Сапожников, 1973; Kniker et al., 1995), но эти исследования выполнены, в основном, на сельскохозяйственных объектах. Исследования воздействия азотных удобрений на свойства лесных почв показали увеличение содержания подвижных соединений азота в почве, улучшение азотного режима питания растений, повышение эффективного плодородия почв (Тамм, 1969; Морозова и др., 1971; Шумаков, 1972, 1974; Куликова, 1973; Победов, Булавик, 1976; Победов и др., 1977; Davis et al., 1991; Mäkipää, 1994). Большое внимание в настоящее время уделяется процессам микробиологической трансформации органического вещества и азотных соединений

в почвах различных насаждений при разнообразных гидротермических условиях (Harris, Riha, 1991; Chao et al., 1993; Saad, Conrad, 1993; Костина и др., 1995).

Применение удобрений в лесу приводит не только к увеличению прироста насаждений, но и к ряду экологических изменений, как положительных, так и отрицательных, в самих насаждениях и окружающей среде. Самые серьезные опасения вызывает возможность загрязнения речных, озерных и грунтовых вод за счет вымывания удобрений из почвы. Увеличивается вынос и поступление в реки и озера азота, фосфора и калия, но наибольшую опасность представляют нитратная и аммиачная форма азота. В то же время исследования показывают, что при обычных нормах минеральных удобрений и правильном внесении их в почву они задерживаются преимущественно в лесной подстилке и торфяном горизонте, передвижение удобрений вглубь почвы и в горизонтальном направлении незначительно. Опасность загрязнения возникает, как правило, вследствие нарушения рекомендаций по применению удобрений и низкого уровня организации работ (Emmet et al., 1993; Ring, 1993). Если ранее активное воздействие на почву осуществлялось в сельском хозяйстве, а основные приемы повышения продуктивности лесов были связаны с действием непосредственно на древостой, то сейчас все больше применяются способы улучшения почвенных условий. Широкое применение находят минеральные азотные удобрения при восстановлении почвенного плодородия в лесах, подвергающихся воздействию промышленного загрязнения (Ege, 1994). Это требует детального исследования протекающих в почве процессов и их воздействия на древесные породы и биогеоценоз в целом.

Одним из основных лесохозяйственных мероприятий в лесу является рубка, которая в значительной степени изменяет окружающую среду и влияет на свойства почвы (Побединский, 1952, 1980; Пятецкий, Морозова, 1962; Морозова, 1964а; Исаев, 1970; Орфанитский, Орфанитская, 1970; Лазарева, Зябченко, 1983; Федоренко, 1983; и др.). Известно, что на сплошной вырубке сильно меняются почвенно-экологические условия: увеличивается количество влаги, поступающее с осадками на поверхность почвы, происходит поднятие уровня почвенно-грунтовых вод и, как правило, временное избыточное переувлажнение почвы. На вырубках выше максимальные и ниже минимальные температуры. После рубки наблюдается и некоторое ухудшение физических свойств почвы, но оно незначительное и проявляется только в верхней части профиля. Более заметные изменения происходят в содержании питательных элементов в подстилке и верхних минеральных горизонтах почвы. Причем в зависимости от место-

нахождения вырубки изменения могут происходить в различных направлениях. В условиях северной и средней тайги на вырубках хвойных пород активизируется процесс подзолообразования, но при зарастании вырубки мелколиственными породами с течением времени начинает прогрессировать дерновый процесс. Уменьшается актуальная и гидролитическая кислотность почвы, уже становится соотношение  $C : N$ , расширяется отношение гуминовых кислот к фульвокислотам. На вырубке изменяется и химический состав опада, поскольку видовой состав растительности иной — преобладают травы. Эти различия определяют характер разложения опада, состав микрофлоры, ее активность. Различные системы рубок по-разному воздействуют на почву, изменяя ее свойства, в том числе и азотный режим. Однако этот вопрос до настоящего времени остается слабо изученным.

## Глава 2

# УСЛОВИЯ ФОРМИРОВАНИЯ ПОЧВ И ПОЧВЕННОГО ПОКРОВА ВОСТОЧНОЙ ФЕННОСКАНДИИ

### 2.1. Климат

Карелия располагается между  $66^{\circ}39'$  и  $60^{\circ}41'$  с. ш., входит в состав Восточной Фенноскандии. На ее территории выделяются две зональные провинции: северотаежная и среднетаежная. Климат умеренно-континентальный с продолжительной мягкой зимой и коротким прохладным летом, высокой относительной влажностью воздуха. Недостаток солнечной энергии возмещается теплом, приносимым воздушными массами с запада. В формировании климата большую роль играют болота и озера, занимающие  $1/3$  часть площади республики. Они сглаживают суточный и сезонный ход температуры, увеличивают влажность воздуха и облачность. Карелия является самым облачным районом России. Количество пасмурных дней летом составляет 60–70%, зимой – 80%. Относительная влажность воздуха во все сезоны очень высокая – ночью – 90–100%, днем – 60–80% и только в отдельные засушливые периоды падает ниже.

Значительная вытянутость территории с севера на юг, а также пересеченный рельеф обусловили климатическую неоднородность. Изменение климата с севера на юг характеризуется нарастанием положительных температур при одновременном увеличении осадков. По климатическим особенностям выделяют три зоны. Северная зона располагается севернее  $64^{\circ}30'$  с. ш. и характеризуется самой низкой температурой ( $+0,5^{\circ}\text{C}$ ), сумма температур выше  $10^{\circ}\text{C}$  не достигает 1000. Годовое количество осадков 500–600 мм, мощность снежного покрова 60–70 см, продолжительность его залегания 210 дней. Коэффициент увлажнения 1,42. В результате слабого испарения происходит интенсивное заболачивание территории. Средняя зона занимает территорию республики между  $64^{\circ}30'$  и  $63^{\circ}$  с. ш. Здесь проходит граница между северной и средней тайгой. Среднегодовая температура  $+1^{\circ}\text{C}$ , сумма температур выше  $10^{\circ}\text{C}$  составляет 1200, количество осадков 650 мм, коэффициент увлажнения 1,15. Мощность снежного покрова 65 см, продолжительность залегания снега 160–180 дней. Южная зона располагается южнее  $63^{\circ}$  с. ш. Среднегодовая температура  $+2^{\circ}\text{C}$ ,



сумма температур выше 10 °С составляет 1400, осадков выпадает до 700 мм, коэффициент увлажнения 1,2.

Самый длительный сезон года в Карелии — зима, от 150 дней на юге до 190 дней на севере. Зимой часто бывают оттепели. Устойчивый снежный покров устанавливается в ноябре, снег лежит до апреля — мая. Весна начинается со второй половине апреля. Температура повышается медленно, что приводит к затяжному снеготаянию и медленному прогреванию почвы. Лето довольно прохладное и дождливое, осень продолжается до ноября. В это время отмечается повышенная облачность, дожди приобретают затяжной характер. Вегетационный период длится 160 дней (Агроклиматические ресурсы..., 1974).

## 2.2. Геология и почвообразующие породы

Карелия находится в восточной части Балтийского щита и отличается от равнинной части России отсутствием мощных толщ осадочных пород. Восточная часть Балтийского щита — это преобразованная интенсивными дислокациями древняя складчатая страна. Преобладающая часть территории Карелии сложена протерозойскими породами, залегающими на размытом складчатом архейском основании. На юге протерозойские породы перекрываются более молодыми кембрийскими. Архейские породы представлены гранитами, гранито-гнейсами и кристаллическими сланцами. Среди протерозойских пород встречаются как осадочные (известняки, песчаники, глинистые сланцы), так и магматические и метаморфические (граниты, диабазы, кварциты, мрамор и пр.) (Кратц, 1963; Геология Карелии, 1987).

В основном коренные породы покрыты толщей четвертичных отложений мощностью от нескольких сантиметров до 150 м, часто встречаются их выходы на дневную поверхность. Отложения мезо-плейстоцена на поверхность не выходят. К неоплейстоценовым отложениям относятся: межледниковые морские и озерные осадки, морена последнего оледенения и связанные с ней флювиогляциальные осадки. Верхняя морена покрывает межледниковые образования. Она образовалась в период последнего Валдайского оледенения (Герасимов, Марков, 1939). Голоценовые осадки представляют собой группы различных по литологии пород — от песков до ленточных глин. В Карелии к древнему и раннему голоцену относятся отложения приледниковых озер, занимающие пониженные участки рельефа. Аллювиальные и делювиальные отложения относятся к среднему и позднему голоцену.

Основными почвообразующими породами на территории Карелии являются четвертичные отложения. Однако в почвообразовании



участвуют и коренные породы: из архейских пород — это гранито-гнейсы и кристаллические сланцы, из протерозойских — диабазы, габбро-диабазы и шунгиты. Химизм четвертичных отложений в значительной степени зависит от минералогического состава коренных пород. Из четвертичных наносов преобладают моренные отложения Валдайского оледенения. Мощность ледниковых моренных наносов постепенно возрастает с северо-запада на юго-восток (Бискэ, 1959). По механическому составу это пески и супеси. В пределах северной части республики преобладает морена грубого, крупнозернистого песчаного состава, содержащая много валунов, в основном кислых пород (гранитов и гранито-гнейсов). Содержание скелета в составе морены колеблется от 64% на севере до 30% на юге республики. Количество илстых частиц незначительно, что связано с заторможенностью процессов химического выветривания. Основными минералами песчаных фракций морены являются кварц и калиевые полевые шпаты. Мелкопылеватые и илстые частицы состоят из гидрослюд, биотита и рудных минералов. В южной части Карелии преобладает морена пылевато-супесчаного механического состава, отличающаяся более высоким содержанием илстых частиц (до 4,5%) и щелочных и щелочноземельных оснований. Основные минералы — это кварц и калиевые полевые шпаты, в иле помимо гидрослюда, кварца и полевых шпатов обнаружены глинистые минералы. В южной и особенно юго-восточной части Карелии довольно широкое распространение получила суглинистая морена. По минералогическому составу она близка к супесчаным отложениям (Четвертичные отложения..., 1993).

В тесной связи с моренными образованиями находятся водно-ледниковые наносы, слагающие озы, камы и зандровые равнины, чаще распространенные в южной части Карелии. Пески озов крупнозернистые или разнозернистые, иногда с включениями гравия. Пески камов и зандровых равнин более однородные, часто слоистые. Все они содержат мало илстых частиц (0,03–0,1%), характеризуются большой водопроницаемостью и низкой влагоемкостью. Они состоят из кварца, калиевых полевых шпатов, слюд, плагиоклаза, роговых обманок, илстые частицы состоят из гидрослюд и каолинита.

Из позднеледниковых отложений встречаются ленточные глины и суглинки, они приурочены к крупным депрессиям рельефа. Эти отложения содержат 30–40% пылеватых частиц и 10–20% ила. Пылеватые частицы ленточных глин состоят, главным образом, из кварца (40–50%) и мусковита, присутствует полевой шпат (10%) и другие минералы. Илстые частицы состоят на 60% из каолинита и на 25% из гидрослюд, присутствуют биотит, кварц, в незначительном количестве другие минералы (Марченко, 1962).

Из послеледниковых отложений наибольшее распространение имеют торфа, занимающие 20% территории республики. Все торфяники молодые, не выходят за пределы суббореального периода. Большинство их образовалось вследствие зарастания водоемов. Характеризуются они низкой зольностью, повышенной обводненностью и слабым разложением органической массы. Мощность торфяных залежей очень разнообразна, от 0,5 до 10 м и более, но преобладают торфа мощностью 1–2 м. Часто торфяные залежи неоднородны: нижние слои сложены низинными торфами, а сверху залегают верховые.

### 2.3. Рельеф

Рельеф Карелии характеризуется значительной пересеченностью и сложностью строения. Основные его формы определились в дочетвертичное время. Тектонические и денудационные процессы, сочетающиеся с медленными колебательными движениями, привели к образованию крупных и мелких трещин, разломов и грабенов. Многочисленные разломы определили черты современного рельефа. Основной чертой рельефа является выдержанность ориентировки крупных ортографических форм в северо-северо-западном направлении, что обусловлено давними тектоническими и денудационными процессами. Денудационные равнины и отпрепарированные гряды широко представлены в Карелии. Последующее действие ледника выразилось в сглаживании выступающих вершин кристаллических гряд, углублении и расширении отрицательных элементов рельефа (ледниковое выпахивание), перераспределении и накоплении рыхлого материала. Это привело к частой смене сельг, высоких холмов узкими и неглубокими понижениями, что придает поверхности сильно пересеченный вид.

Рельеф территории холмисто-равнинный с преобладающим колебанием отметок от 5 до 250 м над уровнем моря. Северо-западная часть Карелии наиболее возвышенная, понижается к Белому морю, Онежскому и Ладожскому озерам. Отступление ледника привело к образованию моренных холмов, широко распространенных на всей территории Карелии. С деятельностью послеледниковых вод связано образование песчаных волнистых равнин, а на юге республики на местах древних озер образовались равнины, сложенные ленточными глинами (Бискэ, 1959).

### 2.4. Растительность

Почти вся площадь Карелии покрыта лесами. Основными лесобразующими породами являются сосна (*Pinus sylvestris* L.), европейская

ель (*Picea abies* (L.) Karst.), береза (*Betula pubescens* Ehrh.), ольха (*Alnus incana* (L.) Moench.) и осина (*Populus tremula* L.). Сосновые леса занимают 61% площади, еловые — 28, березовые — 9,4, осиновые и ольховые — 1,6 (Кищенко, Козлов, 1966).

Большая часть флоры относится к бореальным видам — палеарктическим и европейским, как, например, ель европейская, майник двулистный (*Maianthemum bifolium* (L.) F. W. Schmidt), кислица (*Oxalis acetosella* L.), толокнянка (*Arctostaphylos uva-ursi* (L.) Spreng.), вереск (*Calluna vulgaris* (L.) Hull) и др. Встречаются растения сибирской флоры: ель сибирская (*Picea obovata* Ledeb. Stein.), лиственница сибирская (*Larix sibirica* Ledeb.). В северной части республики распространены представители сибирской флоры: голубика (*Vaccinium uliginosum* L.), багульник (*Ledum palustre* L.), вороника (*Empetrum nigrum* L.), а в южной — растения широколиственных лесов: липа (*Tilia cordata* Mill.), сныть (*Aegopodium podagraria* L.), звездчатка дубравная (*Stellaria nemorum* L.). Для всей подзоны характерна флористическая бедность (около 600 видов высших растений) (Раменская, 1958).

По характеру растительного покрова территория Карелии делится на северную и среднюю подзоны таежной зоны, граница между ними проходит около 63° с. ш. Северотаежные леса характеризуются низкорослостью древостоев, изреженностью полога и низкой производительностью (V—Va классы бонитета). В связи с широким распространением почв легкого механического состава преобладают сосновые древостои. Подзона средней тайги характеризуется более производительными лесами (III—IV классы бонитета). Здесь широко распространены еловые леса, общее число видов высшей растительности возрастает до 910.

На территории Карелии выделяют следующие группы типов леса: лишайниковые, зеленомошные, долгомошные, сфагновые (Яковлев, Воронова, 1959). Лишайниковые типы леса формируются в наиболее сухих местообитаниях — на скальных участках и песчаных отложениях, чаще всего это сосняки. В напочвенном покрове этих лесов господствуют лишайники *Cladonia alpestris* (L.) Rabh., *C. rangiferina*, *C. sylvatica* (L.) Rabh. Из кустарников распространены брусника (*Vaccinium vitis-idaea* L.), толокнянка, вереск. Производительность этих лесов низкая, запасы древесины не превышают 100 м<sup>3</sup> · га<sup>-1</sup>. Общая площадь этих типов леса среди сосняков около 12%, причем в северной тайге их в 2 раза больше, чем в средней.

Зеленомошные леса на территории Карелии занимают наибольшую площадь, среди сосновых — 66%, еловых — 71%. К ним относятся сосняки и ельники брусничные и черничные, ельники кисличные. В северотаежной подзоне к этой группе относятся сосняки и ельники

вересково-брусничные и воронично-черничные. Брусничные леса в этой группе имеют самую низкую производительность (IV—V классы бонитета). В напочвенном покрове обильно произрастает брусника, реже черника (*Vaccinium myrtillus* L.). Хорошо развит моховой покров из *Hylocomium splendens* Hedw., *Dicranum rugosum* Hedw. Черничные леса более производительны, древостои III класса бонитета с запасом древесины  $300 \text{ м}^3 \cdot \text{га}^{-1}$ . В напочвенном покрове господствует черника, появляются травы, моховой покров развит хорошо и состоит из *Hylocomium splendens*, *Pleurozium schreberi* (Willd) Mitt. Леса кисличного типа в Карелии встречаются не часто. Они являются наиболее производительными насаждениями (I—II классы бонитета) с запасом древесины  $400 \text{ м}^3 \cdot \text{га}^{-1}$ . В наземном покрове меньше кустарничков и больше трав: кислица (*Oxalis acetosella*), майник, ландыш (*Convallaria majalis*), золотая розга (*Solidago virgaurea* L.). Моховой покров развит слабо. В северотаежной и среднетаежной подзонах площади сосняков брусничных и черничных примерно одинаковы, но кисличные на территории северной тайги отсутствуют.

В гидроморфных условиях распространены сосняки и ельники долгомошные, травяно- и осоково-сфагновые. Древостои низкобонитетные (V—Va класса) с запасом древесины около  $100 \text{ м}^3 \cdot \text{га}^{-1}$ . Кроме политриховых мхов (*Polytrichum strictum* Sm., *Polytrichum commune* Hedw.) и различных видов сфагнумов, здесь широко распространены багульник, голубика, осоки (*Carex globularis* L., *C. lasiocarpa* Ehrh.), хвощ лесной (*Equisetum sylvaticum* L.) и др. В гидроморфных проточных условиях произрастают высокопроизводительные ельники травяно-болотные (II—III классы бонитета). В травяном покрове встречаются таволга (*Filipendula struthiopteris* (L.)), осока пузырчатая (*Carex vesicaria* L.), калужница болотная (*Caltha palustris* L.) и др. Из мхов присутствует сфагнум, из зеленых мхов — *Pleurozium schreberi*. Гидроморфные типы лесов на территории среднетаежной подзоны распространены в меньшей степени, чем в северотаежной, по сравнению с лесами нормального увлажнения (Казимиров и др., 1971, 1977).

## **Глава 3**

### **ПОЧВЫ И ПОЧВЕННЫЙ ПОКРОВ РЕГИОНА ИССЛЕДОВАНИЯ**

#### **3.1. Особенности почвенного покрова региона**

Природные особенности Карелии с ее умеренно холодным климатом и преобладанием почвообразующих пород легкого механического состава обусловили широкое распространение элювиально-иллювиального процесса почвообразования. В автоморфных условиях на рыхлых четвертичных отложениях распространены подзолистые почвы (53%), на коренных породах — подбуры, буроземы (0,2%) и слабо-развитые (1,3%); при дополнительном увлажнении — болотно-подзолистые почвы (17,2%), в гидроморфных условиях — болотные (20,2%) (Морозова, 1991). Резкой смены типов почв при продвижении с севера на юг не наблюдается, но все же в почвенном покрове северотаежной и среднетаежной подзон имеются некоторые различия.

В северотаежной подзоне в связи с холодным климатом и неглубоким прогреванием почвенной толщи активными процессами почвообразования затронута лишь верхняя часть почвообразующих пород (40–60 см), почвы имеют укороченный профиль. Наряду с широким распространением подзолов, в почвенном покрове значительное место занимают болотно-подзолистые и болотные почвы. На грядах, достигающих высоты 600 м над уровнем моря, можно проследить вертикальную зональность почвенного покрова. Почвы подзолистого типа, распространенные до высоты 400–500 м, сменяются горно-подзолистыми, а выше 500 м — горно-тундровыми почвами. Вдоль побережья Белого моря встречаются своеобразные маршевые почвы.

В среднетаежной подзоне большое распространение имеют автоморфные почвы подзолистого типа, среди которых подзолы иллювиально-гумусово-железистые супесчаные занимают наибольшие площади. Почвообразованием затронута большая толща рыхлых отложений: до глубины 1,5 м — на легких породах, 2,0–2,5 м — на суглинистых отложениях. Для почв южной Карелии довольно характерен гумусово-аккумулятивный процесс, который приводит к формированию подзолистых почв, а не подзолов. Особенно активно он протекает на супесчаных, легко- и среднесуглинистых отложениях в связи

с вырубкой хвойных и заселением этих территорий лиственными породами (осина и береза), а также интенсивным развитием травяного покрова. В Заонежье и Приладожье в денудационно-тектоническом ландшафте широко распространены почвы буроземного типа.

Почвенный покров Карелии отличается очень сложным строением, мозаичностью и мелкоконтурностью, вызванной чрезвычайной расчлененностью рельефа и частой сменой почвообразующих пород.

### 3.2. Почвы сосновых лесов

Известно, что сосна обыкновенная (*Pinus sylvestris* L.) отличается приуроченностью к широкому спектру местообитаний с различными эдафическими условиями. Поэтому она произрастает на подзолистых, болотно-подзолистых и болотных почвах, а также на почвах буроземного типа почвообразования. Наиболее типичными являются почвы легкого механического состава, чаще песчаные, но встречаются и супесчаные, с двучленным строением профиля — это поверхностно-подзолистые и подзолы. Подзолы делятся на роды по содержанию углерода в иллювиальном горизонте следующим образом: иллювиально-железистые содержат в этом горизонте менее 1,5% гумуса, иллювиально-гумусово-железистые — 1,5–3,0%; иллювиально-железисто-гумусовые — 3,0–5,0 и торфянистые иллювиально-гумусовые, относящиеся уже к болотно-подзолистым почвам, — более 5% гумуса (Морозова, Лазарева, 1979).

На болотно-подзолистых почвах сосну чаще всего можно встретить в местах распространения торфянистых иллювиально-гумусовых подзолов, а из болотных почв — на торфяных переходных. Приведенные ниже почвы составляют экологический ряд по увлажнению, различаются по плодородию и, соответственно, производительности произрастающих насаждений.

**Поверхностно-подзолистые почвы** распространены, в основном, в средней тайге на мощных хорошо дренированных песках под сосняками лишайниковыми, вересково-лишайниковыми (рис. 1). Это озерно-ледниковые равнины или озово-камовые комплексы. В северной тайге они встречаются и на высоких моренных равнинах. Механический состав песков, на которых развиваются почвы, весьма разнообразен. Это сухие и бедные местообитания, мощность подстилки всего лишь 1–2 см. Почвы очень кислые,  $pH_{KCl}$  в верхней части профиля 3,4–3,9; в нижней части кислотность снижается до 4,9–5,0. Содержание углерода в подстилке 10–43%, общего азота — 0,1–1,0%, в иллювиальном горизонте углерода менее 1%, азота — 0,02%.



*Морфологическое строение поверхностно-подзолистой почвы следующее:*

0 0–3 см. Лесная подстилка из хвои, коры, шишек, ветвей, отмерших лишайников, иногда на поверхности встречаются пятна накипных лишайников, рыхлого сложения. Растительные остатки слабо разложены. Наблюдаются экскременты почвенных животных, в основном клещей. В нижней части встречаются угли. Довольно много зерен минерального мелкозема.

A2B 3–8 см. Серый с буроватыми пятнами (зоны, прокрашенные тонкодисперсным светло-бурым гумусом, чередуются с серыми отмытыми). Горизонт имеет рыхлое сложение, пронизан тонкими корнями. В верхней части встречаются угли. Много полуразложившихся растительных остатков, вокруг которых располагаются грибные гифы. Минеральный скелет состоит из хорошо окатанных зерен кварца и полевых шпатов.

Bf 8–16 см. Светло-охристый, песчаный, слабо уплотненный, много тонких корней, книзу окраска светлеет. Орштейны темно-коричневого цвета, округлой формы, размером 0,2–2,0 мм, компактного и рыхлого сложения. По трещинам тонкие кутаны. Зерна минералов покрыты органико-железистыми пленками. Часто колломорфное вещество образует глобулярные сгустки, что свидетельствует об их преимущественно железистом составе. Переход в следующий горизонт постепенный.

B2 16–38 см. Светло-бурый, песчаный, встречается галька серого цвета, слабо уплотненный, корней мало. Резко уменьшилась степень покрытия зерен пленками и толщина пленок. Пленки часто прерывистые, локальные. Возросла доля глинистых и пылеватых частиц, многие из которых не покрыты колломорфным материалом.

BC 38–60 см. Серовато-палевый слоистый песок с включениями шунгитовой гальки и крупнозернистых частиц, встречаются отдельные ржавые пятна. Переход в нижний горизонт ясный. Микростроение сходно с предыдущим горизонтом, лишь количество кутан продолжает уменьшаться.

C 60–75 см. Серый с темными прослойками тонкозернистый слоистый песок, в темных прослойках много мелких шунгитовых частиц.

**Подзолы иллювиально-железистые** (рис. 2) развиваются на песчаных озерных, водно-ледниковых и моренных отложениях от тонкозернистых до крупнозернистых по гранулометрическому составу. В северотаежной подзоне на них произрастают лишайниковые и бруснично-вороничные сосняки, в среднетаежной – в основном сосняки брусничные. На железистых подзолах, сформировавшихся на песчаных отложениях, подстилаемых породами более тяжелого механического состава, встречаются сосняки черничные свежие.

Лесная подстилка подзолов иллювиально-железистых в 1,5–2 раза более мощная, чем поверхностно-подзолистых почв. Это связано





*Рис. 1. Поверхностно-подзолистая почва под сосняками лишайниковыми (вереско-лишайниковыми)*



*Рис. 2. Подзолы иллювиально-железистые под сосняками брусничными*

с лучшими условиями увлажнения, более высоким содержанием элементов питания и лучшей продуктивностью насаждений. Кислотность в верхней части профиля высокая (рН 3,3–3,4), в нижней рН составляет 4,8–4,9. Содержание углерода в подстилках около 30%, азота 1,0%, в минеральных горизонтах соответственно 0,3–1,0; 0,05–0,03%.

*Подзол иллювиально-железистый на флювиогляциальных отложениях:*

L 0–2 см. Листовой слой подстилки состоит из слабо разложившихся остатков мхов и хвои, рыхлый. У неразложившихся хвоинок отчетливо различаются устьица. Слабо разложившиеся имеют разрывы, трещины, устьица менее заметны. Внутри хвоинок встречаются экскременты клещей.

F 2–4 см. Ферментативный слой подстилки состоит из полуразложившихся остатков хвои, ветвей, шишек, мхов. Остатки шишек, коры сохранились лучше, степень разложения хвои больше. Гифы грибов проникают внутрь хвоинок, оплетают их обломки. Много экскрементов клещей. Подгоризонт имеет рыхлое сложение, слоистый характер. Встречаются угли.

A2 4–9 см. Серый, песчаный, сухой, рыхлый. В верхней части встречаются остатки корней, экскременты клещей, гифы грибов. Живых корней мало. Минеральные зерна, в основном кварца и полевых шпатов, покрыты тонкими пленками светло-бурого тонкодисперсного гумуса, к низу толщина пленок увеличивается. В верхней части встречаются угли. В нижней части наблюдаются орштейны округлые, компактного и рыхлого сложения. Нижняя граница горизонта языковатая.

Bf 9–28 см. Бурый, песчаный, с мелкой галькой, рыхлый, много мелких корней. Песчаные зерна покрыты компактным чехлом колломорфного материала. Покровы разбиты извилистыми трещинами дегидратации. Из колломорфного вещества образуются глобулярные сгустки, что является следствием их железистого состава. Отмечаются остатки жизнедеятельности микрофлоры. Переход в нижележащий горизонт постепенный.

B2 28–59 см. Светло-бурый, песчаный, с единичной галькой, корней мало. Уменьшилось по сравнению с вышележащим горизонтом количество покрытых пленками минеральных зерен, а также толщина пленок. Возросла степень примеси глинистых и пылеватых частиц. В составе пленок к низу возросла роль глинистых и пылеватых частиц. Переход в следующий горизонт постепенный.

BC 59–105 см. Палевый с ржавыми пятнами и потеками, песчаный с единичной галькой, рыхлый. Количество зерен, покрытых пленками, резко уменьшилось, лишь в зонах ржавого цвета отмечается много кутан. На границе с нижним горизонтом полоса ржавых пятен, приуроченная к крупнозернистым пескам.

C 105–115 см. Палевый песок тонкозернистый, слоистый. Слои мало-мощные (1–2 см), более темного цвета, с ржавым оттенком.

*Подзол иллювиально-железистый на двучленных отложениях:*

О 0–5 см. Лесная подстилка средней степени разложения, слоистая, обильно пронизана корнями, сложена остатками хвои, кустарничков, веток, корней; свежая, есть мицелий. На границе перехода в нижележащий горизонт — угли.

А2 5–10 см. Серого цвета, свежий, бесструктурный, песчаный среднезернистый, связный, встречаются живые корни, переход в нижележащий горизонт хорошо заметен. Граница — по волнистой линии, повторяющей микрорельеф.

Вг 10–24(35) см. Буровато-коричневатый, среднезернистый связный песок, до глубины 36 см встречаются ортштейновые зерна, много корней, бесструктурный. Переход хорошо заметен по цвету.

В2 24(35)–41 см. Оливкового цвета, буровато-коричневые потеки и пятна, свежий, уплотненный, песчаный, бесструктурный, корней мало. Переход по изменению механического состава.

II В3 41–53 см. Палевый, плотный, суглинистый, свежий, в нижней части — рыжеватые пятна оксида железа. Корней нет. Переход по волнистой линии, выделен по изменению механического состава.

ВС 53–100 см. Палевого цвета, слоистый, супесчаный, плотный, свежий, корней нет, присутствуют марганцевые конкреции. Граница перехода по изменению цвета, плотности и механического состава.

С 100–160 см. На сером фоне коричневые и рыжеватые пятна, песчаный, плотный, свежий, присутствуют марганцевые конкреции.

**Подзолы иллювиально-гумусово-железистые** (рис. 3) формируются в мезоморфных условиях на валунных грубозернистых песках, а также на валунных супесях (песчаная и супесчаная морена). На этих почвах произрастают сосняки черничные свежие в среднетаежной подзоне и воронично-черничные в северной тайге. Профиль более мощный, чем у железистых подзолов, различий в северной и средней тайге по мощности профиля не выявлено. Характерным для этих подзолов является более мощная лесная подстилка и подзолистый горизонт, более высокое содержание углерода (в А0 — 39,5%, в минеральных горизонтах — 0,2–1,1%) и элементов минерального питания (1,3% N в подстилке, в минеральных горизонтах — 0,05–0,01%). Величина  $pH_{KCl}$  в верхних горизонтах — 3,3–3,4, в нижних — до 4,4–4,7. Местообитания довольно продуктивные, встречаются насаждения III класса бонитета.

*Морфологическое строение подзола иллювиально-гумусово-железистого:*

L 0–2 см. Подгоризонт лесной подстилки из мхов, хвои и листьев, слабо или неразложившихся, рыхлый. Много неразложившихся хвоинок. Слабо разложившаяся хвоя имеет разрывы, трещины. Внутри хвоинок встречаются экскременты клещей.





*Рис. 3. Подзолы иллювиально-гумусово-железистые под сосняками черничными*

F 2–4 см. Подгоризонт темно-бурого цвета, состоит из полуразложившихся остатков растительных тканей, в нижней части много углей. Гифы грибов проникают внутрь хвоинок, оплетают их обломки. Много экскрементов клещей. Густо переплетен корнями.

A2 4–10 см. Серый, в верхней части темнее, остатки корней, экскременты клещей, гифы грибов. Песчаный, среднезернистый, с единичной галькой. Живых корней мало. Минеральные зерна покрыты тонкими пленками светло-бурого тонкодисперсного гумуса, к низу толщина пленок увеличивается.

Bhf 10–20 см. Темно-бурый, песчаный. Доминирует тонкодисперсный гумус и гумусово-железистая плазма, которые заполняют пространство между минеральными зёрнами. Все зёрна минералов покрыты колломорфным материалом. Пленки – изотропные бурые и светло-бурые, разбиты сетью трещин дегидратации. Диффузная форма гумуса преобладает, но иногда встречаются отдельные сгустки бурого цвета. Наблюдаются отдельные корневые остатки, которые обволакиваются гифами грибов. В верхней части встречаются угли, много мелких корней. Переходит в нижний горизонт постепенно.

Bf 20–40 см. Светло-бурый с бурыми пятнами, песчаный с единичной галькой, влажный, корней немного. Микросложение сходно с предыдущим горизонтом, но есть и некоторые особенности. Количество органического материала с глубиной снижается. Пленки на зёрнах минералов становятся прерывистыми.

BC 60–100 см. Палевый с бурыми потеками, пятнами, примазками, по ходам мертвых корней пятна очень тесные, песчаный, влажный. Отдельные минеральные зерна покрыты колломорфным материалом, но в целом количество его невелико.

C 120–140 см. Серый с ржавыми пятнами и прослойками песок, среднезернистый, мокрый.

**Подзолы иллювиально-железисто-гумусовые** (рис. 4) относятся к почвам полугидроморфного ряда, формируются в условиях дополнительного увлажнения. Они приурочены к низким озерным и озерно-ледниковым равнинам, сложенным слоистыми тонкозернистыми песками, подстилаемыми более тяжелыми породами (суглинками и глинами). К подзолам железисто-гумусовым приурочены сосняки черничные влажные и кустарничково-долгомошные. Характерной чертой подзолов железисто-гумусовых является мощная грубогумусная лесная подстилка (6–9 см), мощный подзолистый горизонт (6–9 см), иногда оглеенный, иллювиальный горизонт – с высоким содержанием углерода (3%). Почвы кислые:  $pH_{КС}$  в верхней части профиля – 3,2–3,5, в нижней – 4,7–4,8. Лесная подстилка характеризуется низкой степенью гумификации и минерализации, количество углерода в ней 45%, азота – 1,23%. Разложение растительных остатков замедлено в связи с повышенным увлажнением.

*Морфологическое строение профиля подзола иллювиально-железистого-гумусового:*

L 0–3 см. Лесная подстилка из мхов, опада, хвои и листьев, слаборазложившаяся, слоистая, влажная.

F 3–5 см. Лесная подстилка из полуразложившихся мхов, ветвей, рыхлая, влажная, густо переплетена корнями.

H 5–9 см. Черный, иловатый с примесью песчаных частиц, влажный, много корней.

A2 9–23 см. Белесый с темными примазками и буроватыми пятнами, песчаный, среднезернистый, влажный, корни единичные, крупные. Граница перехода ясная, языковатая.

Bh 23–50 см. Коричневато-кофейный, в верхней части темнее, темные пятна распространяются по ходам корней, песчаный, среднезернистый, влажный, уплотненный, много мелких корней. Переходит в нижний горизонт постепенно.

Bf 50–60 см. Бурый, окраска неоднородная, много коричневых и ржавых пятен по ходам корней, влажный.

B2 60–70 см. Светло-бурый, пестро окрашенный, много ржавых пятен, прослоек, книзу более серый, мокрый, песок среднезернистый с включением шунгитовых зерен.

Cg 70–100 см. Серый с ржавыми пятнами и прослойками, песчаный, сырой.

**Торфянистые подзолы иллювиально-гумусовые** (рис. 5) относятся к болотно-подзолистым почвам, приурочены к окраинам болот и низким зандровым равнинам. Развиваются на разнозернистых и тонкозернистых песках, подстилаемых глинами. Лесная подстилка имеет мощность около 15 см и менее кислая, чем подзолистый горизонт, где величина  $pH_{КС}$  составляет 2,9–3,0. Содержание углерода в подстилках 45%, в иллювиальном горизонте около 5%. Азота в подстилках 1,00%, в минеральных 0,16–0,02%. На этих почвах произрастают в северной тайге сосняки багульниковые, а в средней – кустарничково-долгомошные.

*Морфологическое строение профиля торфянистого подзола иллювиально-гумусового:*

L 0–5 см. Светло-бурый неразложившийся сфагновый очес.

F 5–12 см. Бурый полуразложившийся очес, густо пронизан корнями. Сложен слабо и полуразложившимися остатками сфагновых и политриховых мхов, опада сосны и кустарничков. Степень раздробленности растительного материала различна, но преобладают достаточно крупные остатки мхов и корней волокнистой структуры, у которых сохранилась клетчатка клеточных стенок и проводящих сосудов. У мелких остатков растительных тканей клетчатка местами разложена. Гифы грибов проникают внутрь





*Рис. 4. Подзолы иллювиально-железисто-гумусовые под сосняками черничными влажными*



Рис. 5. Торфянистые подзолы иллювиально-гумусовые под сосняками кустарничково-долгомошными

растительных остатков, оплетают их. Зерна минералов очень редки. Сложение очень рыхлое.

T1 12–24 см. Черно-бурый, хорошо разложившийся торф, густо переплетен корнями, в верхней части встречаются угли. Растительные остатки имеют степень разложения от слабой до сильной. Преобладают темно-бурые остатки тканей мхов и корней. У многих из них волокнистая структура нарушена, как бы выедена. Высокая степень раздробленности материала. Встречаются экскременты первичных разлагателей — сапрофагов, которые состоят из плохо переваренных растительных тканей с включением минералов. Внутри остатков ткани гумифицированы, преобразованы в аморфное темно-бурое вещество. Агрегированность отсутствует.

A2 24–40 см. Темно-серый, песчаный, много углей, корней мало, переход в нижний горизонт неясный. На отмытых зернах минералов наблюдаются локальные органогенные сгустки, гифы грибов, пылеватые частицы первичных минералов. Зерна кварца имеют многочисленные каверны, углубления. Все зерна полевых шпатов в значительной степени корродированы. На поверхности зерен довольно много обломков диатомовых водорослей, что является показателем гидроморфных условий.

A2B 40–45 см. Неоднородно окрашенный, буроватый с белесыми и коричневыми пятнами. Зоны отмытых зерен чередуются с зонами, где зерна покрыты чехлом колломорфного материала. В целом горизонт имеет много общего с предыдущим, но в нем увеличивается количество вымытого органического материала. По сравнению с нижележащим горизонтом здесь пленки на минеральных зернах прерывистые, расположены локально. Много непрочных железистых конкреций.

Bh 45–57 см. Коричневато-кофейный, сверху более темный, песчаный, с единичным хрящом. Переход в следующий горизонт постепенный. Доминирует тонкодисперсный гумус и гумусово-железистая плазма, которые заполняют пространство между минеральными зернами. Все зерна минералов покрыты сплошным слоем колломорфного материала. Пленки — изотропные бурые и светло-бурые. Они разбиты сетью трещин дегидратации. Диффузная форма гумуса преобладает, но иногда встречаются отдельные сгустки бурого цвета. Наблюдаются отдельные корневые остатки, которые обволакиваются гифами грибов. Заметны следы жизнедеятельности микрофлоры, а также примеси пылеватых и глинистых частиц. Характер распределения гумуса, а также его микроформы натечные.

Bfh 57–64 см. Бурый, песчаный с гравием, внизу сизые и темные пятна. Встречаются темные марганцовистые примазки. Микросложение сходно с предыдущим горизонтом, однако отмечается ряд особенностей. Количество органического материала с глубиной снижается. Пленки на зернах минералов становятся прерывистыми. Доля глинистых и пылеватых частиц возрастает, многие из них не покрыты колломорфным материалом. С глубиной также возрастает роль глинистых и пылеватых частиц в составе пленок.



ВСg 64–85 см. Сизый, тонкозернистый, однородный песок с темными примазками. Отдельные минеральные зерна покрыты колломорфным материалом, но в целом количество его невелико. Сизый цвет свидетельствует о близком залегании грунтовых вод.

**Болотные почвы** (рис. 6) формируются в условиях избыточного увлажнения в глубоких депрессиях рельефа — в понижениях между моренными холмами, сельгами, среди зандровых равнин. В зависимости от породы и химического состава вод, питающих болотные массивы, характера и состава торфяной залежи болотные почвы делятся на три типа: верховые торфяные, переходные торфяные и низинные торфяные (Бухман, Цыба, 1967). Кроме того, выделяют подтипы: торфяные почвы, торфяно-глеевые, обедненные торфяно-глеевые, обедненные торфяные (Морозова, 1991).

Торфяные почвы имеют слабо дифференцированный профиль, состоящий из следующих горизонтов: OT1 – T2 – T3 и т. д. по степени разложения торфа. Верховые и переходные торфяные почвы кислые:  $pH_{KCl} = 2,9–3,5$ ; имеют малую зольность (1,5–4,0%), слабую степень разложения (5–10%). Содержание углерода в них составляет 47,5–50,0%, азота — 1,7–2,0%. Зольность и степень разложения торфа увеличиваются с глубиной. Болотные низинные почвы развиваются в условиях богатого минерального питания. Эти почвы находятся чаще всего под травянистой растительностью или древесно-кустарниковой (береза, ольха, ива, ель). Иногда на них произрастают сосново-еловые леса. Почвы кислые,  $pH_{KCl} 3,6–3,8$ . Зольность выше, чем у верховых и переходных торфяных почв (8–17%), содержание углерода — 43–46, азота — 3,0–4,0%.

В торфяно-глеевых почвах выделяют следующие горизонты: A0T1 – T1 – T2 – G. Верховые торфяно-глеевые довольно распространены как в средней, так и в северной таежной подзоне Карелии. Почвы эти кислые,  $pH_{KCl} 3,0–3,5$ , имеют низкую зольность (1,8–2,5%) и слабую степень разложения торфяных горизонтов (5–10%). В северной подзоне на этих почвах преобладают сосняки багульниково-сфагновые (82,6%); травяно-сфагновые и осоково-сфагновые встречаются реже. В средней подзоне тайги сосняки представлены в основном багульниковыми и сфагновыми типами леса (61,3%), довольно часто встречаются травяно-сфагновые, осоково-сфагновые (23,8%) и долгомошные (13,2%) (Медведева и др., 1979).

*Торфяная почва, развитая на торфе переходного типа:*

OT1 0–4 см. Очес сфагновый, неразложившийся.

OT2 4–7 см. Светло-бурый, слабо разложившийся сфагновый очес, много корней. Горизонт состоит в основном из крупных обломков мхов



*Рис. 6.* Сосняк багульниково-сфагновый. Почва – торфяная, переходного типа

и корней. Сохраняется клетчатка клеточных стенок и проводящих сосудов. У мелких обломков растительного материала встречаются локальные потемнения, где клетчатка начинает разлагаться.

T1 7–23 см. Темно-коричневый торф, хорошо разложившийся, много мелких корней, влажный, уплотненный. Многие остатки преобразованы в аморфное темно-бурое вещество. Горизонт не агрегирован. Высокая степень раздробленности растительного материала. Редкие минеральные компоненты оказываются «погруженными» в гумифицированное органическое вещество, полуразложившиеся растительные остатки.

T2 23–45 см. Темный торф, слабо разложившийся, много остатков кустарничков. Горизонт сложен растительными остатками различной степени разложившимися, но в основном слабо разложившимися. Клеточное строение тканей сильно нарушено. Вокруг клеточных стенок находится желто-бурая плазма, которая частично заполняет образовавшиеся пустоты.

G 45 см и глубже. Сизый, крупнозернистый, илистый песок.

#### Морфологические особенности почв сосновых лесов

Описанные почвы различаются по уровню увлажнения в связи с различным местоположением в рельефе и зачастую представляют собой экологический ряд (катену). В морфологическом строении исследованных почв прослеживается сходство O (AT) – A2 – Bhf (Bf, BC) – C. Установлено, что от условий увлажнения зависят мощность и характер генетических горизонтов. Сверху вниз по элементам рельефа увеличивается мощность органогенного горизонта. В верхней части катены она составляет около 2–3 см и состоит из слабо разложенных растительных остатков, в средней части профиля увеличивается до 5 см, отмечается ее слоистость и дифференциация по степени разложившихся растительных остатков. В нижней части катены мощность подстилки возрастает до 20 см и переходит в сфагновый очес и торфянистый горизонт.

Мощность подзолистого горизонта зависит от условий увлажнения и мощности лесной подстилки. В верхней части геоморфологического профиля он выражен линзами, иногда кремнеземистой присыпкой. Ниже по склону подзолистый горизонт имеет мощность около 4 см. В почвах подзолистого типа для него характерна ярко-белесая окраска. Внизу катены мощность этого горизонта достигает 16 см. В этой части профиля в болотно-подзолистых почвах окраска подзолистого горизонта сероватая, так как он пропитан почечным гумусом. Кроме того, отмечается много бурых пятен и потоков.

Выраженность и морфологические особенности иллювиального горизонта также меняются вниз по катене. Мощность его отразить



достаточно сложно, так как переход в нижележащий горизонт, как правило, постепенный по интенсивности окраски. Качественные же характеристики, сложение этого горизонта находятся в прямой зависимости от типа леса и вида почвы. В верхней части катены иллювиальный горизонт имеет ржаво-бурый, охристый цвет, постепенно переходящий в бурый и буровато-желтый, рыхлого сложения. В средней ее части этот горизонт приобретает буроватый оттенок, в сухом состоянии уплотнен. В нижней части геоморфологического профиля он коричневато-кофейного цвета, в верхней части более темный, что обусловлено повышенным содержанием иллювиально-гумусовых веществ. В нижней части почвенного профиля появляются сизые пятна, что свидетельствует о наличии процессов оглеения.

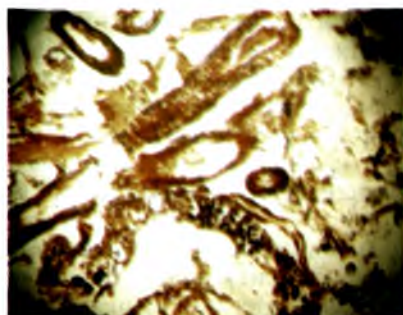
Таким образом, для почв подзолистого типа характерна грубогумусная мало- и среднemoшная подстилка, белесый горизонт мощностью до 10 см и иллювиально-железистый горизонт. Болотно-подзолистым почвам свойственны мощная оторфованная подстилка, окрашенная потечным гумусом мощный подзолистый горизонт и иллювиально-гумусовый горизонт. В целом мощность и характер лесной подстилки, подзолистого и иллювиального горизонтов хорошо коррелируют с уровнем увлажнения и типом растительности.

В различных частях катены количество растительного опада, его состав, а также скорость разложения растительных остатков различны. Основная часть органического вещества исследованных почв приурочена к подстилке. Мощность подстилок также варьирует в зависимости от типа леса. Однако изучение морфологии и микроморфологии показало, что в их строении имеется много общего.

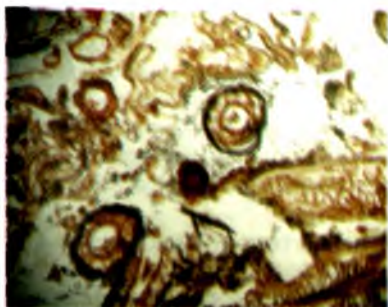
В повехностно-подзоистой почве лесная подстилка представлена слабо и среднеразложившимися растительными остатками. Такую степень разложенности имеют и верхние части подстилок расположенных ниже по склону почв. Микроморфологическое исследование показало, что их наибольший объем занимает желтая или слегка побуревшая хвоя. Растительные остатки сохранили свою морфологию. Слабо разложившийся материал имеет отдельные трещины и разрывы, содержит достаточно много мелких пустот внутри тканей. На месте выеденной хлоренхимы часто встречаются экскременты клещей. Вокруг растительных остатков отмечается обилие грибных гиф. На поперечном срезе хорошо видны сохранившиеся клеточные стенки (рис. 7, а).

Ферментативный слой подстилок состоит из полуразложившихся остатков (рис. 7, б). Практически он представляет собой следующую стадию трансформации растительного материала. Такие растительные

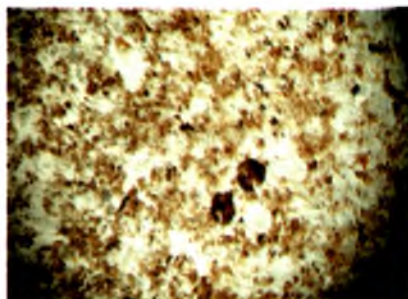
а



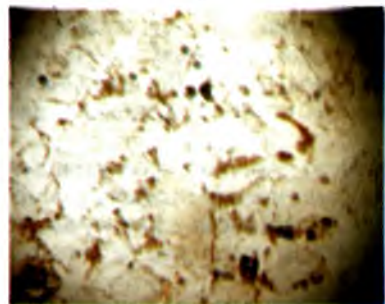
б



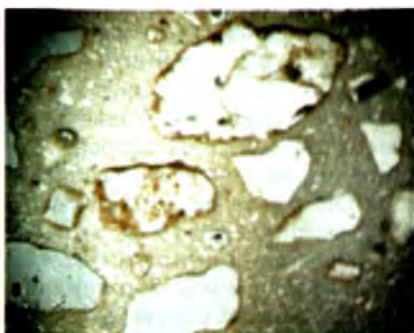
в



г



д



*Рис. 7.* Микростроение лесных подстилок и минеральных горизонтов почв

остатки имеют более темный цвет, у них обнаруживаются детали клеточного строения. Наблюдается обилие гиф и плодовых тел грибов, часто гифы оплетают и проникают в обломки хвои. Более разложены остатки хвои. Ветви, шишки, кора сохраняются лучше. Многие остатки хвои заполнены экскрементами клещей. Появляются более темно окрашенные экскременты беспозвоночных. На месте разложения мягких тканей, рядом с экскрементами клещей часто отмечаются сгустки бурого и темно-бурого гумуса рыхлого сложения. Такие сгустки составляют не более 10% от всей органической массы.

В нижней части подстилок растительные остатки имеют высокую степень разложенности (рис. 7, в). Остатков с сохранившимся клеточным строением немного. Гифы грибов оплетают растительные остатки, но количество их меньше, чем в вышележащем подгоризонте. Экскременты почвенных беспозвоночных окрашены почти в черный цвет. Между растительными остатками наблюдается тонкодисперсный гумус, диффузный и в виде сгустков. Гумус темно-бурого, почти черного цвета. Сгустки имеют рыхлое сложение. Встречаются минеральные частицы, в основном зерна кварца и полевых шпатов, но объем их составляет не более 8–10%.

В подстилках встречаются обуглившиеся растительные остатки, а также фитолиты, которые образуются из аморфного кремнезема, высвобождающегося из растительных клеток по мере разложения. Они накапливаются в поверхностных горизонтах и, как правило, сильно корродированы.

Микроморфологические исследования также позволили установить, что микростроение подзолистого горизонта почв катены сходное. На поверхности минеральных зерен, отмытых от  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  и ила, присутствуют локальные органогенные сгустки, пылеватые частицы первичных минералов (рис. 7, г). Вокруг них наблюдаются фрагменты грибных гиф. Почти на каждом зерне находятся фрагменты биогенных образований. Кварцевые зерна имеют многочисленные углубления, каверны, частично эти изменения унаследованы, а некоторые появились в результате кислотно-биохимического растворения. Зерна полевых шпатов также интенсивно корродированы.

В то же время подзолистые горизонты почв катены имеют некоторые особенности. В подзоле иллювиально-железистом песчаные зерна хорошо окатаны и практически лишены красящих пленок. Лишь в отдельных зернах полевых шпатов по трещинам спайности, в углублениях встречаются локальные бурые (железистые) покровы. В подзоле иллювиально-гумусовом в верхней части подзолистого горизонта довольно много компонентов органического вещества, таких как

экскременты почвенной мезофауны, остатки корней, комочки аморфного гумуса, отдельные гифы грибов. Они занимают пространство между минеральными зернами и постепенно исчезают с глубиной. На протяжении всего горизонта зерна покрыты тонкой пленкой светло-бурого тонкодисперсного гумуса.

Минеральные зерна иллювиальных горизонтов покрыты чехлом колломорфного материала (рис. 7, д). Практически все покровы разбиты трещинами дегидратации. Колломорфное вещество часто образует глобулярные сгустки, что связано с их преимущественно железистым составом.

В горизонте В2 пленки имеют локальный характер, становятся прерывистыми. Возрастает доля глинистых и пылеватых частиц, многие из них не покрыты колломорфным материалом. В иллювиально-железистом горизонте пленки содержат меньше трещин дегидратации, чем в иллювиально-железисто-гумусовом, хорошо заметны примеси глинистых и пылеватых частиц.

Количество органического вещества в иллювиальном горизонте заметно возрастает при движении вниз по склону. Преобладают гумусово-железистая плазма и тонкодисперсный гумус, они заполняют пространство между зернами минералов. Доминирует диффузная форма гумуса, но встречаются и отдельные сгустки бурого цвета. Характер распределения гумуса — натеchnый.

С увеличением увлажнения в наибольшей степени изменяются строение и мощность органогенного подгоризонта Н. На вершине катены он практически отсутствует, ниже по склону слабо выражен и состоит в основном из сильно разложившихся остатков, образующих рыхлые агрегаты. В нижней части катены подгоризонт Н мощный, отчетливо выражен, состоит из разложившихся, но менее измельченных остатков. Характерным признаком оторфовывания является извитость растительных остатков, а также локализация в комочки содержимого их клеток.

В подстилках, а также в верхней части подзолистого горизонта автоморфных почв отмечается обилие экскрементов клещей и обрывков тонких грибных гиф. В полугидроморфных почвах появляются копролиты дождевых червей.

Для колломорфного гумуса выделенных органопротилей характерна гелеобразность, связанная с малой зрелостью («конденсированностью») гумуса.

В плазме органогенных и органо-минеральных горизонтов отмечается значительное количество частиц аморфного тонкодисперсного гумуса. «Аморфизация» гумуса на тонкодисперсной стадии связана, по-видимому, с зимним промерзанием почв.

### Химические и физические характеристики почв сосновых лесов

Почвы сосновых лесов формируются на кислых по химическому составу породах. Содержание кремнезема в них колеблется от 79 до 84%. На втором месте по количеству находится алюминий – 10–11%. В сумме два этих окисла составляют более 90% от общего количества химических элементов. Из других элементов больше всего содержится железа и натрия. Характерно преобладание щелочных элементов над щелочноземельными. В золе торфяных почв содержание кремния – 35–72%, алюминия – 10–37%, кальция – 1–10% и зависит от слагающих торфяные толщи растений и питающих их вод. В подзолистых и болотно-подзолистых почвах четко выражено элювиально-иллювиальное распределение кремнекислоты и полуторных окислов по профилю. Все изученные почвы содержат небольшое количество железа (Морозова, Федорцев, 1992).

Данные почвы характеризуются сильно- и среднекислой реакцией среды (табл. 1). Наиболее низкие значения pH отмечены в нижних слоях лесных подстилок (2,7–3,3) и элювиальных горизонтов (3,3–3,9). В иллювиальных горизонтах кислотность резко снижается, и pH солевой вытяжки колеблется в пределах 4,3–5,0. Высокая кислотность лесных подстилок и элювиальных горизонтов связана с большим количеством в них ненасыщенных гумусовых кислот. В иллювиальных горизонтах гумусовые кислоты осаждаются в виде комплексов с полуторными окислами. Осаждение их происходит как вследствие изменения реакции среды, так и в результате насыщения раствора данными соединениями и их взаимной коагуляции. Болотно-подзолистые почвы более кислые по сравнению с подзолистыми.

Степень насыщенности основаниями лесной подстилки колеблется от 26 до 60%. Верхние ее слои содержат больше поглощенных оснований, поэтому степень насыщенности их выше, чем нижних. По мере увеличения увлажнения почв степень насыщенности основаниями подстилок уменьшается. Минеральные горизонты подзолистых песчаных почв имеют довольно высокую степень насыщенности основаниями, что связано с их малой емкостью поглощения. Поэтому, несмотря на небольшое количество поглощенных оснований, степень насыщенности высокая, особенно это характерно для нижних горизонтов почвы. Степень насыщенности основаниями подзолистых почв выше, чем болотно-подзолистых.

Болотные почвы характеризуются очень кислой реакцией и сильной ненасыщенностью основаниями (от 22 до 47%). Это связано с высокой емкостью обмена и большим количеством (25–48 мг-экв.) поглощенного водорода.



Таблица 1

## Химические свойства почв сосновых лесов

Гори- зонт	Глуби- на, см	рН (KCl)	V	C	N	C/N	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	K <sub>2</sub> O
			%				мг на 100 г почвы	
Поверхностно-подзолистая песчаная на флювиогляциальных отложениях								
0	0—3	3,4	60,1	27,1	0,66	41	4,7	38,2
A2	3—7	3,9	68,7	1,8	0,04	45	2,2	1,7
Bf	7—15	4,6	66,0	0,7	0,05	14	9,2	0,9
B2	15—35	5,0	84,7	0,3	0,02	15	8,3	0,6
C	55—80	4,8	92,6	0,1	0,01	10	16,0	0,8
Подзол иллювиально-железистый песчаный на флювиогляциальных отложениях								
0	0—3	3,4	36,4	43,5	0,76	57	14,4	77,0
A2	3—8	3,3	16,8	1,2	0,05	24	1,4	2,1
Bf	8—30	4,8	61,2	0,5	0,03	17	9,8	0,9
B2	30—55	4,9	86,7	0,2	0,01	20	14,8	0,8
C	100—110	5,0	95,3	0,1	0,01	10	17,4	0,7
Подзол иллювиально-железистый песчаный на слоистых озерно-ледниковых отложениях								
0	0—5	2,9	24,0	46,3	1,40	33	37,5	84,0
A2	5—10	3,0	3,6	0,5	0,07	7	0,7	1,2
Bf	10—24	4,7	9,5	0,8	0,09	9	21,7	1,6
B2	24—41	4,7	6,1	0,3	0,07	4	7,5	1,0
ПВ3	41—53	4,3	60,0	0,2	0,08	2	4,8	2,0
BC	53—100	4,5	79,0	0,2	0,06	3	42,3	2,4
C	100—160	4,6	90,0	0,1	—	—	39,6	1,6
Подзол иллювиально-гумусово-железистый песчаный на флювиогляциальных отложениях								
0	0—4	3,3	36,4	49,5	1,30	38	30,3	73,0
A2	4—10	3,4	32,8	1,1	0,05	22	0,9	1,4
Bhf	10—20	4,3	68,0	0,9	0,05	19	8,2	0,7
Bf	20—40	4,7	86,9	0,3	0,02	15	14,7	0,7
BC	60—100	4,8	93,5	0,2	0,01	20	14,0	0,3
Подзол иллювиально-железисто-гумусовый песчаный на флювиогляциальных отложениях								
0	0—5	2,8	34,1	44,7	1,23	36	41,2	70,2
A2	9—23	3,8	56,5	0,3	0,03	10	0,3	0,5
Bfh	23—50	4,3	21,5	2,3	0,12	19	6,9	1,9
Bf	50—60	4,7	67,6	0,3	0,03	10	5,7	1,1
B2	60—70	4,8	74,9	0,1	0,02	5	10,7	0,7
Cg	70—100	4,7	61,3	0,1	0,01	10	12,0	2,3
Торфянистый подзол иллювиально-гумусовый песчаный на флювиогляциальных отложениях								
0	0—13	3,4	25,9	46,5	1,21	38	14,7	64,5
T1	13—27	2,7	10,9	37,4	1,10	34	12,9	39,9
A2B	43—47	4,0	53,2	0,6	0,03	20	0,9	0,4
Bh	47—53	4,3	39,9	1,4	0,07	20	1,6	0,8
Bfh	53—60	4,5	74,3	0,5	0,05	10	2,5	0,7
BCg	60—90	4,6	78,8	0,2	0,05	4	23,4	1,3
Торфяная переходная								
T1	10—13	3,0	21,8	47,5	1,70	28	14,9	29,6
T2	13—26	3,1	47,6	50,4	2,00	25	3,9	11,2
T2	26—53	3,9	34,3	50,0	1,90	26	2,9	15,8



В подзолистых почвах по мере увеличения степени их увлажнения возрастает содержание органического вещества в лесной подстилке и иллювиальном горизонте и убывает — в подзолистом. Максимальное накопление углерода в иллювиальном горизонте отмечено в подзолах иллювиально-железисто-гумусовых под сосняками черничными влажными. Этим же почвам свойственно наименьшее содержание углерода в элювиальном горизонте.

Болотно-подзолистые почвы характеризуются еще большим накоплением органического вещества на поверхности и иллювиальном горизонте и выносом его из подзолистого горизонта. В болотных почвах накапливается большое количество органического вещества по всему профилю.

С содержанием органического вещества тесно связано накопление в почвах азота. В лесных подстилках подзолистых почв количество азота составляет 0,66–1,30%, наибольшее — в органогенном горизонте подзола иллювиально-железистого, сформировавшегося на слоистых отложениях (1,40%). Минеральные горизонты подзолистых почв бедны азотом, количество которого колеблется от 0,01 до 0,1%. В почвах подзолистого типа содержание азота убывает с глубиной. В болотно-подзолистых — отмечается накопление его в лесной подстилке и иллювиальном горизонте, соответственно — 1,21 и 0,07%. В профиле болотных почв содержание азота составляет 1,7–2,0%.

Почвы, сформировавшиеся на однородных флювиогляциальных песчаных отложениях, отличаются низким содержанием подвижного калия, количество которого в минеральных горизонтах не превышает 2 мг на 100 г почвы. При формировании почв на слоистых озерных отложениях и характеризующихся анизотропным строением профиля отмечается повышенное содержание калия, связанное с большим количеством мелкодисперсной фракции. Характерно биогенное накопление калия в лесных подстилках.

Содержание фосфора по профилю почв изменчиво. В лесных подстилках происходит биогенное накопление фосфора. Верхняя толща почв обеднена фосфором за счет выноса его растениями. Нижняя толща содержит большое количество подвижных форм фосфорных соединений. Чем выше влажность почвы, тем большая ее толща обеднена подвижными соединениями фосфора и тем больше его накапливается в лесной подстилке.

Плотность твердой фазы почвы в минеральных горизонтах довольно близкая во всех почвах и изменяется от 2,5 до 2,7. В почвах на однородных флювиогляциальных отложениях ее величина с глубиной постепенно возрастает (табл. 2). Все почвы имеют невысокую общую плотность, которая с глубиной постепенно увеличивается.

В исследованных почвах порозность варьирует в широких пределах в зависимости от их механического состава. Слоистое строение почвы на озерно-ледниковых отложениях отразилось на ее водно-физических свойствах. Горизонты с повышенной плотностью имеют низкую порозность. При показателях плотности почвы 1,5–1,8 рост корней древесных пород становится затруднительным (Орлов, Кошельков, 1971).

Таблица 2

Физические и водно-физические характеристики почв сосновых лесов

Гори- зонт	Глубина, см	Плотность	Плотность твердой фазы	Максимальная гигроско- пичность, %	Порозность, % от объема почвы
		г · см <sup>-3</sup>			
Поверхностно-подзолистая песчаная на флювиогляциальных отложениях					
A2	2-6	1,11	2,58	1,36	56,8
Bf	6-16	1,24	2,64	1,13	53,0
B2	16-36	1,29	2,68	0,84	51,9
C	50-80	1,34	2,68	0,45	50,1
Подзол иллювиально-железистый песчаный на флювиогляциальных отложениях					
A2	3-8	1,10	2,61	0,76	57,9
Bf	10-30	1,20	2,66	1,23	50,0
B2	30-40	1,30	2,69	0,63	53,6
C	100-110	1,60	2,68	—	43,9
Подзол иллювиально-железистый песчаный на слоистых озерно-ледниковых отложениях					
A2	5-10	1,24	2,66	0,77	53,4
Bf	10-24	1,22	2,59	2,31	52,9
B2	27-37	1,49	2,60	1,02	42,7
II B3	43-53	1,59	2,68	1,71	40,7
BC1	60-70	1,63	2,71	0,88	39,8
BC2	85-95	1,76	2,70	2,00	34,8
C	100-150	1,72	2,70	0,95	36,7
Подзол иллювиально-гумусово-железистый песчаный на флювиогляциальных отложениях					
A2	4-10	1,13	2,61	2,03	56,7
Bhf	10-20	1,20	2,65	1,36	54,7
Bf	20-30	1,32	2,68	0,90	50,6
BC	60-70	1,36	2,68	0,35	49,9
C	100-110	1,29	2,70	—	—
Подзол иллювиально-железисто-гумусовый песчаный на флювиогляциальных отложениях					
A2	9-23	0,58	1,87	12,18	93,6
Bfh	23-50	1,19	2,58	2,68	54,2
Bf	50-60	1,37	2,68	0,58	48,9
B2	60-70	1,40	2,69	0,38	48,0
Cg	70-100	1,47	2,68	0,33	45,9

Данные почвы характеризуются невысокой максимальной гигроскопичностью. Чем выше гумусированность почвенных горизонтов, тем больше ее величина. Почвы с анизотропным строением профиля характеризуются более высокой максимальной гигроскопичностью, чем сформировавшиеся на однородных песчаных отложениях.

Режим влажности песчаных почв определяется водно-физическими свойствами песков: высокой впитывающей способностью, слабой водоудерживающей, водоподъемной и адсорбционной способностью. Считается, что режим влажности песчаных почв является неустойчивым (Орлов, Кошельков, 1971). Одной из важнейших характеристик водного режима песчаных почв является аккумуляция в них влаги. Для среднетаежной подзоны количество воды в слое 0–150 см почв различных типов леса различается: наибольшие показатели отмечены в подзолах иллювиально-железисто-гумусовых сосняков черничных влажных (645–693 мм в год) и наименьшие – в поверхностно-подзолистых почвах сосняков вересково-лишайниковых (55–95) (табл. 3). В целом почвенные запасы влаги при переходе от одного биогеоценоза к другому в экологическом ряду возрастают от сосняка вересково-лишайникового к сосняку черничному влажному и затем к сосняку на болотно-подзолистых и болотных почвах.

Таблица 3

Колебания запасов влаги в песчаных почвах сосновых лесов, средние данные за вегетационные периоды (май – сентябрь) (n = 4 года), мм

Глубина, см	Поверхностно-подзолистая	Подзол иллювиально-железистый	Подзол иллювиально-гумусово-железистый	Подзол иллювиально-железисто-гумусовый
0–20	15,1–24,7	16,3–22,6	25,0–31,5	35,6–47,9
0–50	23,8–43,5	30,1–42,3	40,9–54,1	78,6–99,9
0–100	40,7–69,9	59,2–110,6	77,1–90,8	223,4–268,0
0–150	58,6–95,6	87,8–110,6	181,7–231–3	645,4–693,3

*Примечание.* По данным Г. В. Ерукова, Г. В. Власковой (1986).

Оптимальные температурные условия складываются в почвах сосняков черничных свежих. По мере уменьшения запасов влаги в почвах сосняков брусничных и вересково-лишайниковых прогревание почвенных горизонтов уменьшается, хотя на поверхности средние показатели температур за вегетационный период, а также по месяцам близки. Аналогичная закономерность прослеживается и с увеличением уровня увлажнения почв к соснякам черничному влажному и багульниково-сфагновому (табл. 4).

Таблица 4

Температуры в песчаных почвах сосновых лесов, °С

Почва	Глубина, см	Июнь	Июль	Август	Сентябрь	Среднее за период наблюдений
Поверхностно-подзолистая	0	15,9	17,6	14,7	9,5	14,4
	5	10,9	13,8	11,9	7,4	11,0
	10	9,8	12,8	11,4	7,2	10,3
	15	9,4	12,3	11,2	7,2	10,0
	20	8,9	11,9	11,2	7,5	9,9
Подзол иллювиально-железистый	0	14,7	17,1	13,6	8,6	13,5
	5	10,0	13,0	11,3	7,1	10,4
	10	9,0	12,0	10,9	7,1	9,7
	15	8,6	11,6	10,8	7,2	9,6
	20	8,2	11,3	10,8	7,2	9,4
Подзол иллювиально-гумусово-железистый	0	15,6	17,4	13,9	7,9	13,7
	5	13,3	14,9	12,4	7,4	12,0
	10	10,9	13,1	11,5	7,3	10,7
	15	9,6	12,0	10,9	7,2	9,9
	20	8,8	11,5	10,6	7,5	9,6
Подзол иллювиально-железисто-гумусовый	0	22,1	20,9	15,3	8,4	16,6
	5	11,7	13,6	11,8	7,4	11,2
	10	8,8	11,4	10,7	7,3	9,6
	15	8,0	10,6	10,3	7,3	9,1
	20	7,5	10,1	10,1	7,3	8,8
Торфяная переходная	0	15,6	17,4	13,9	8,0	13,7
	5	10,3	13,3	11,6	6,8	10,5
	10	7,8	11,2	10,7	6,9	9,1
	15	7,3	10,4	10,2	6,8	8,7
	20	7,0	10,0	10,5	7,4	8,7

Примечание. По данным Г. В. Ерукова, Г. В. Власковой (1986).

### 3.3. Почвы еловых лесов

Приуроченность еловых насаждений к типам почв изучена, в основном, в среднетаежной подзоне Карелии, где еловые леса являются преобладающей формацией и состоят из ассоциации ели обыкновенной (*Picea abies*). Современные границы распространения, видовой состав и производительность еловых лесов Карелии определяются природными условиями, хозяйственной деятельностью человека и длительностью периода произрастания насаждений на занятой ими площади. Установлено, что наибольшее влияние на производительность ельников оказывают почвообразующие породы (Казимиров,

Морозова, 1973). Их механический состав и сложение весьма существенно влияют на физико-химические свойства, гидротермический режим и биологию почвы, а это решающим образом определяет видовой состав растительности, продолжительность и энергию роста древесных растений.

Еловые леса распространены чаще всего на почвах более тяжелого механического состава, чем сосновые, но встречаются насаждения, сформировавшиеся и на песках. Основными почвообразующими породами почв под еловыми лесами являются супесчаная или суглинистая морена, а также ленточные глины. На них формируются подзолы иллювиально-гумусово-железистые и иллювиально-железисто-гумусовые, пятнисто-подзолистые почвы, подзолистые суглинистые и глинистые, элювиально-поверхностно-глееватые. Типичными для еловых лесов являются буроземные почвы, сформировавшиеся на элюво-делювии диабазов, моренных и озерных отложениях, обогащенных элювием диабазов. На торфяных почвах, подстилаемых суглинками и глинами, распространены переувлажненные типы еловых лесов. Химическая характеристика почв еловых лесов приведена в табл. 5.

**Подзолистые иллювиально-гумусово-железистые и иллювиально-железисто-гумусовые почвы** формируются на пологих склонах моренных гряд, сложенных песками и супесями (рис. 8). Подзолистые почвы еловых насаждений характеризуются кислой реакцией и низкой насыщенностью основаниями. В этих почвах максимальное подкисление отмечается в верхней части профиля. Наибольшую кислотность имеют нижние слои подстилки и элювиальные горизонты.

Органическое вещество накапливается на поверхности и в иллювиальных горизонтах, содержание азота тесно с ним связано. Лесная подстилка характеризуется широким отношением  $C : N$ . В этом горизонте выявлена биогенная аккумуляция фосфора и калия. В минеральных горизонтах распределение калия неравномерное, количество подвижного фосфора возрастает с глубиной. На этих почвах произрастают ельники брусничные и черничные.

*Морфологическое строение профиля подзолистой иллювиально-гумусово-железистой почвы:*

0–4 см. Лесная подстилка коричневого цвета, состоит из опада хвои, мхов и ветвей, густо переплетена корнями.

A1A2 4–7 см. Серый, супесчаный, сильно гумусирован, густо переплетен корнями. Граница перехода в горизонт A2 не выражена.

A2 7–15 см. Белесый, песчаный, в верхней части местами сероватый от присутствия гумуса.

Таблица 5

## Химические свойства почв еловых лесов

Гори- зонт	Глубина, см	рН (KCl)	V	C	N	C/N	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	K <sub>2</sub> O
			%				мг на 100 г почвы	
Подзолистая иллювиально-гумусово-железистая супесчаная на морене								
L	0—2	3,2	82	71,9	1,69	43	31,2	146,0
F	2—4	3,8	26	74,6	1,56	48	42,5	128,0
A1A2	4—7	3,7	19	1,6	0,07	23	Следы	5,0
A2	7—15	3,6	27	0,6	0,02	30	Следы	3,1
B1	15—37	5,1	72	1,2	0,06	20	6,8	5,6
B2	37—60	4,8	62	0,5	0,03	17	12,3	4,2
BC	60—114	4,7	71	0,3	0,03	10	74,7	4,0
C	114—123	4,5	67	0,3	0,04	8	55,2	4,0
Пятнисто-подзолистая супесчаная на морене								
L	0—2	4,7	47	79,5	1,87	43	25,0	78,0
F	2—4	4,4	32	54,7	1,52	36	19,0	56,0
A1A2	5—10	4,0	33	6,2	0,32	19	3,0	6,0
A2	12—20	4,2	48	0,6	0,02	30	3,0	0,5
B1	22—40	4,6	55	1,2	0,04	30	5,0	6,8
B2	40—60	4,8	66	1,0	0,03	33	—	6,0
BC	70—80	5,0	78	0,9	0,03	30	3,0	5,7
Элювиально-поверхностно-глееватая на ленточных глинах								
0	0—5	3,6	39,9	34,1	1,50	23	43,5	81,3
A1A2	5—6	3,5	24,7	1,9	0,66	3	16,3	10,5
ABh	6—15	3,8	40,6	0,8	0,30	3	28,4	10,2
IIA2g	15—35(50)	4,3	43,6	0,8	0,09	9	47,2	12,0
IIBtg	35(50)—70	4,4	88,5	0,3	0,05	6	64,5	14,1
IIBtC	70—120	4,6	96,2	Следы	0,01	—	70,0	2,2
C	120—190	4,7	98,0	Следы	0,01	—	73,7	11,3
Бурозем грубогумусный типичный								
0	0—2	4,4	98,0	24,0	1,2	20,0	87,5	90,0
A1	2—6	4,4	96,9	8,9	0,36	25,0	34,0	14,0
Bfm	7—45	4,3	84,4	2,5	0,34	9,1	50,0	2,0
BC	50—80	4,5	88,3	1,0	0,13	8,0	63,0	4,4
C	90—100	4,8	97,6	0,6	0,12	5,0	90,0	4,8
Торфяно-перегнойно-глеевая на двучленных отложениях								
0T	0—5	6,0	84,2	64,1	2,06	31	4,6	2,7
AT1	5—20	5,9	72,6	74,0	2,25	33	24,4	1,7
AT2	20—40	5,8	80,1	54,2	1,39	39	46,2	0,8
Bg	40—70	6,1	68,2	2,2	—	—	40,0	0,2
Dg	80—90	6,2	85,2	1,4	—	—	49,0	0,1
Торфяная переходная								
0	0—10	3,3	50,0	67,3	1,87	36	34,2	125,4
T1	10—20	3,4	37,5	67,3	2,14	31	20,0	54,3
T2	20—30	3,5	33,0	69,3	2,51	28	20,3	39,4
T3	30—40	3,8	26,4	77,2	3,21	24	Следы	20,5
Dg	100—110	3,9	54,5	5,1	0,27	19,0	Следы	3,0





*Рис. 8. Подзолистые иллювиально-гумусово-железистые под ельниками черничными*

B1 15–26 см. Бурый, супесчаный с валунами, встречаются марганцевые и железистые конкреции, много корней древесных растений. При переходе в горизонт B2 постепенно светлеет.

B2 26–60 см. Светло-бурый, супесчаный с большим количеством щебня, гальки и валунов, очень плотный.

BC 60–114 см. Серовато-желтый, сильно каменистый песок. В подстилающую породу переходит постепенно.

C 114–123 см. Светло-серая, завалуненная супесь.

**Пятнисто-подзолистые почвы песчаные и супесчаные** формируются на склонах завалуненных моренных гряд (рис. 9). Особенностью их строения является прерывистый подзолистый горизонт и наличие хорошо отбеленных пятен в верхней части иллювиального горизонта. Пятнистость подзолистого горизонта связывается с неравномерностью просачивания атмосферных осадков, вызванной высокой завалуненностью почвообразующих пород. Пятнисто-подзолистые почвы отличаются от подзолов повышенным плодородием в результате накопления органического вещества и элементов минерального питания в горизонте A1A2. Обменная кислотность почв невысокая и колеблется по профилю от 4,0 до 5,0. На пятнисто-подзолистых почвах формируются ельники черничные и кисличные.

*Морфологическое строение профиля пятнисто-подзолистой почвы:*

0 0–4 см. Лесная подстилка темного цвета, хорошо разложившаяся.

A0A1 4–5 см. Темно-серый, супесчаный, сильно гумусирован, сплошь переплетен корнями.

A1A2 5–10 см. Темно-серый с бурым оттенком, супесчаный, рыхлый, густо пронизан корнями.

A2 10–22 см. Светло-серый с буроватым оттенком, супесчаный с хрящом и валунами. Залегает отдельными языками и пятнами по ходам крупных корней и вокруг валунов.

B1 22–47 см. Бурый, супесчаный, пылеватый, уплотненный, встречаются линзы суглинка.

B2 47–65 см. Палево-бурый, суглинистый с песчаными прослойками и обломками кристаллических пород, плотный, ореховатый.

C 65–80 см. Суглинок такого же цвета, с песчаными прослойками, много обломков кристаллических пород, очень плотный.

**Буроземы грубогумусные типичные** развиваются на рыхлых отложениях мощностью более 50 см пологих склонов (рис. 10). Почвы, развитые на элюво-делювии, имеют более интенсивную охристо-коричневую окраску, чем на моренных и озерных отложениях.

Почвообразующие породы сильнокаменистые. Содержание крупнозема в почвах, сформировавшихся на элюво-делювии, составляет 10–30%, на моренных отложениях – 25–35, на озерных – 8–24. Содержание физической глины в мелкоземе около 20%, ила – редко превышает 5%. Почвообразующие породы сильно варьируют по химическому составу, соответственно сильно варьируют химические показатели буроземов. В целом содержание кремнезема составляет около 70%, железа – 9–19, высока степень насыщенности основаниями, в первую очередь за счет кальция. Для гумусовой части профиля характерна высокая гидролитическая кислотность, почвы кислые ( $pH = 4-5$ ). Содержание фосфора высокое, а содержание калия зависит от минералогического состава почвообразующих пород. На данных почвах произрастают ельники кислично-черничные.

*Морфологическое строение профиля грубогумусного типичного бурозема:*

0 0–2 см. Лесная подстилка темного цвета, хорошо разложившаяся.

A1 2–6 см. Темно-коричневый, супесчаный, сильно гумусирован, сплошь переплетен корнями.

Bfm 6–45 см. Коричневый с бурым оттенком, супесчаный, уплотненный, густо пронизан корнями, встречается элювий коренных пород.

BC 45–60 см. Бурый, суглинистый, уплотненный, насыщенность корнями низкая, много элювия, обломки разного размера.

C 65–80 см. Палево-бурый, суглинистый, плотный, корней нет, очень много элювия кристаллических пород.

**Элювиально-поверхностно-глееватые и глеевые почвы** имеют локальное распространение и приурочены к выходам ленточных озерно-ледниковых глин и суглинков на дневную поверхность (рис. 11). Сложение ленточных глин определяет водный режим почв (табл. 6). Горизонтальная слоистость и наличие вертикальных трещин обуславливают удовлетворительный дренаж. Эти почвы имеют кислую реакцию ( $pH_{KCl} 3.6-4.2$ ), вниз по профилю обменная кислотность убывает, а насыщенность основаниями возрастает. Органическое вещество сосредоточено в горизонтах A0, A1A2, ABh, вниз по профилю количество его постепенно снижается. Отношение C : N в этих почвах значительно уже, чем в подзолистых. По профилю почв оно варьирует, что связано с различным составом и численностью микробыоты генетических горизонтов. В этих условиях формируются высокопроизводительные еловые леса черничного, кисличного или разнотравного типов.



*Рис. 9. Пятнисто-подзолистая супесчаная под ельниками кисличными*





*Рис. 10.* Буроземы типичные под ельниками кислично-черничными





*Рис. 11. Элювиально-поверхностно-глееватая под ельниками разнотравными*

Таблица 6

Физические и водно-физические свойства элювиально-поверхностно-глееватой глинистой почвы

Гори- зонт	Глубина, см	Плотность твердой фазы	Плотность общая	Порозность	Наименьшая влагоемкость
		г · см <sup>-3</sup>			
A1A2	4—5	2,53	0,83	75,5	36,4
	5—10	2,64	0,93	65,0	29,6
ABh	10—15	2,62	1,16	55,8	27,9
	15—20	2,71	1,55	50,8	20,7
IIA2g	20—30	2,74	1,66	49,2	20,6
	30—40	2,75	1,70	40,5	20,3
IIBt	40—50	2,73	1,69	40,1	21,0
	50—60	2,75	1,67	41,7	22,6
	60—70	2,74	1,59	41,7	23,3
	70—80	2,74	1,56	44,3	24,1
	80—90	2,70	1,51	44,0	26,4
	90—100	2,69	1,50	44,2	26,4
	100—110	2,73	1,50	46,5	26,1
	110—120	2,74	1,54	48,2	25,9
IIBC	120—130	2,70	1,56	49,0	25,7
	130—140	2,69	1,56	48,2	25,7
IIC	140—150	2,69	1,55	48,2	25,4

*Морфологическое строение профиля элювиально-поверхностно-глееватой почвы:*

L 0–4 см. Темно-коричневый, рыхлый, растительные остатки сохранили черты исходной формы.

F 4–5 см. Темно-коричневый, почти черный, хорошо разложившийся, встречаются зерна кварца.

A1A2 5–6 см. Светло-серый с буроватым оттенком, глинистый, рыхлый, структура чешуйчатая. В верхней части темно-серые глинистые комочки, сцементированные гумусом. Переход в нижележащий горизонт четкий.

ABh 6–15 см. Неоднородно окрашен: от тускло-бурого в микропонижениях до коричневато-охристого, глинистый, с признаками вымывания органического вещества. Новообразования в виде мелких непрочных органо-железистых стяжений. Книзу охристый оттенок постепенно ослабевает, а плотность горизонта увеличивается. Граница перехода четкая.

IIA2g 15–35(50) см. Палево-буроватый, глинистый, очень плотный, содержит большое число железистых конкреций. По ходам корней и трещинам – серовато-белесые пленки. Переход постепенный, сильно растянут, неровной линией.

IIbtg 35(50)–70 см. Неоднородно окрашен, серовато-бурый с расплывчатыми палево-белесыми пятнами, очень плотный, слитный, с нечетко выраженным ленточным сложением, небольшим количеством мелких железистых конкреций, трещиноват.

IIbtC 70–120 см. Палево-белесая тонкослоистая ленточная глина. Крупные вертикальные трещины. Оглеение локализовано вокруг корневых ходов в виде сизовато-белесых колец с охристой каймой.

C 120–190 см. Палево-белесая ленточная глина с редкими охристо-бурыми пятнами. Сложение плотное.

**Торфяно-перегнойно-глеевые почвы** формируются в долинах ручьев на песчаных отложениях, подстилаемых глиной (рис. 12). Они имеют слабоокислую реакцию ( $\text{pH}_{\text{сол}} 5,8\text{--}6,2$ ) и высокую степень насыщенности основаниями (60–85%). Зольность верхних горизонтов составляет 20,7–27,3%. Эти почвы содержат значительное количество подвижных соединений фосфора и калия, особенно богаты фосфором нижние горизонты. Небольшое накопление валового азота приурочено к органогенным горизонтам, причем содержание его значительное. Отношение C : N довольно широкое, что свидетельствует о слабой степени разложения органического вещества. На них произрастают ельники болотно-травяные и хвощово-сфагновые.

*Морфологическое строение профиля торфяно-перегнойно-глеевой почвы:*

AT1 0–20 см. Черный торф с большим количеством корней, рыхлый, полуразложившийся.

AT2 20–45 см. Черный торф, хорошо разложившийся, сырой, густо пронизан корнями.

A2B1 45–80 см. Темно-серый, песчаный, среднетекстурный, внизу с ржавыми пятнами, мокрый.

Dg 80–100 см. Сизый с ржавыми пятнами, суглинистый с линзами песка и глины, плотный.

**Торфяные почвы переходного типа** формируются в депрессиях рельефа при близком залегании грунтовых вод и наличии водоупора (коренные породы, суглинки и глины). Болотные почвы ельников кислые, pH солевой вытяжки колеблется по профилю от 3,3 до 4,0. Зольность возрастает вниз по профилю от 4,9 до 24,3%. Содержание углерода и азота высокое, однако широкое соотношение этих элементов свидетельствует о неблагоприятных условиях разложения органического вещества. На них произрастают ельники хвощово-сфагновые и долгомошные.



*Рис. 12. Торфяно-перегнойно-глеевые под ельниками хвощово-сфагновыми*

*Морфологическое строение профиля торфяной почвы переходного типа:*

OT 0–10 см. Очес из неразложившихся мхов и травяно-кустарничковой растительности.

T1 10–20 см. Торф коричневого цвета, среднеразложившийся.

T2 20–30 см. Торф темно-коричневого цвета, хорошо разложившийся. На изломе видны растительные остатки.

T3 30–40 см. Торф темно-коричневый, хорошо разложившийся.

T4 40–80 см. Торф светло-коричневого цвета, хорошо разложившийся.

Dg 100–110 см. Сизый с ржавыми пятнами, суглинистый с линзами песка и глины, плотный. Вся толща почвы насыщена водой.

## Глава 4

# ЗАПАСЫ ОРГАНИЧЕСКОГО ВЕЩЕСТВА И АЗОТА В ЛЕСНЫХ БИОГЕОЦЕНОЗАХ

### 4.1. Запасы органического вещества и азота в фитомассе сосновых и еловых лесов

Исследования, проведенные в нашей стране (Ремезов и др., 1959; Родин, Базилевич, 1965; Волков, 1967; Поздняков и др., 1969; Кылли, Кяхрик, 1970; Базилевич, Родин, 1971; Белоногова, 1971; Иванчиков, 1971; Молчанов, 1971, 1974; Смирнов, 1971; Чепурко, 1971; Говоренков, 1972; Казимиров, Морозова, 1973; Каменецкая и др., 1973; Зябченко, 1974; Юркевич, Ярошевич, 1974; Казимиров и др., 1977, 1990, 1991; Чертов, 1981; Monserud et al., 1996) и за рубежом (Hoffmann, 1968; Lowry, 1975; Walter, 1979; Wright, 1998), позволили выявить определенную зависимость запаса, состава и прироста фитомассы лесных насаждений от климатических, эдафических и возрастных факторов.

#### Сосновые леса

Общая масса органического вещества в средневозрастных сосняках Восточной Финноскандии колеблется от 61,7 до 136,1 т · га<sup>-1</sup>. На долю древостоя приходится 89–97% от всей фитомассы, растения напочвенного покрова составляют 3–11%. Запас фитомассы определяется производительностью древостоя. При изменении производительности на I класс бонитета общая масса увеличивается на 25,0–26,6 т · га<sup>-1</sup> (Казимиров и др., 1977). При повышении производительности древостоя отмечено уменьшение массы растений напочвенного покрова в зеленой части насаждений. Выявлено довольно стабильное соотношение массы отдельных частей древостоя: хвоя и листья составляют 4–7%, ветви – 9–10%, стволы – 66–71% и корни – 16–17% от общей массы древостоя.

По производительности сосновые насаждения Восточной Финноскандии близки к соснякам Архангельской области (Молчанов, 1971) и значительно уступают таковым Белоруссии (Юркевич, Ярошевич, 1974) и Сибири (Поздняков и др., 1969).



В северотаежной подзоне сосняки менее производительны, запас фитомассы их меньше в 2–3 раза, чем в средней тайге. С. С. Зябченко (Казимиров и др., 1977) отмечает некоторые особенности структуры фитомассы сосняков северной тайги. На севере более развит ассимиляционный аппарат, выше доля участия в составе фитомассы ветвей и корней, особенно тонких, активных. При снижении суммы активных температур (выше  $10^{\circ}$ ) на каждые  $100^{\circ}$  масса стволов уменьшается на  $18 \text{ т} \cdot \text{га}^{-1}$ , или на 13%.

В составе фитомассы живой напочвенный покров составляет 3,2%. Доля участия мхово-кустарничкового яруса увеличивается в северотаежной подзоне в 1,5 раза. По данным К. Н. Манакова (1973), в тундровых биогеоценозах запасы напочвенного покрова возрастают в 2 раза по сравнению с северной тайгой.

Запас фитомассы сосняков, произрастающих в близких климатических условиях, определяется уровнем почвенного плодородия. Так, в экологическом ряду сосняков (вересково-лишайниковый – брусничный – черничный свежий – черничный влажный – кустарничково-долгомошный – багульниково-сфагновый) общий запас фитомассы колеблется от 85 до  $136 \text{ т} \cdot \text{га}^{-1}$ . Из этого количества на древостой приходится 89–97%, на растения напочвенного покрова – 3–14%. Надземная часть фитомассы составляет 79–82%, зеленые (фотосинтезирующие) органы – 4–10%. Чем производительнее насаждение, тем ниже доля растений напочвенного покрова в общем объеме фитомассы и выше общая фитомасса. Доля надземной части фитомассы не связана с производительностью древостоя и имеет тенденцию к снижению по мере увеличения влажности почвы.

В процессе возрастного развития биоценоза запас фитомассы значительно изменяется. По данным А. Д. Волкова (1967), запас органического вещества сосняка брусничного изменяется от 27,0 до  $265,9 \text{ т} \cdot \text{га}^{-1}$ , в дальнейшем происходит снижение массы за счет опадения древостоев. Доля живого напочвенного покрова в сосняках до 90 лет падает, а затем возрастает, поскольку древостой изреживается. В сосняках черничных прирост фитомассы происходит до 160 лет, затем он уменьшается. Масса напочвенного покрова до 40-летнего возраста остается постоянной, затем увеличивается до 140 лет и в дальнейшем не претерпевает изменений. Структура фитомассы изменяется с возрастом. Масса хвои в сосняке черничном нарастает до 50 лет, в брусничном – до 80, т. е. доля хвои в спелых сосняках брусничных выше, чем в черничных, что является фактором адаптации к более суровым условиям среды. Масса стволов, ветвей и корней в сосняке брусничном увеличивается до 180-летнего возраста.

С изменением структуры древесного полога изменяется и видовой состав растений напочвенного покрова. В сосняке черничном масса мхов возрастает с  $1,3 \text{ т} \cdot \text{га}^{-1}$  в 20 лет до  $73 \text{ т}$  к 140 годам и остается постоянной до 200 лет. Масса кустарничков и трав в 20-летнем насаждении  $4,2 \text{ т} \cdot \text{га}^{-1}$ , к 100 годам уменьшается в 2 раза и в дальнейшем остается без изменений. Количество черники почти не изменяется от возраста насаждения, а брусники падает почти в 4 раза. Количество разнотравья максимально в молодых насаждениях ( $0,5 \text{ т} \cdot \text{га}^{-1}$ ) и постепенно уменьшается до  $0,1 \text{ т} \cdot \text{га}^{-1}$  к 180 годам.

Для познания емкости и интенсивности биологического круговорота веществ в лесных биогеоценозах необходимо изучение процессов аккумуляции углерода, азота и зольных элементов. Это дает возможность выявить роль отдельных растений в процессах почвообразования, а также установить вынос элементов минерального питания при проведении различных хозяйственных мероприятий, особенно концентрированной рубки древостоя. В настоящее время при комплексном использовании древесного сырья, когда вывозится древесина, ветви, листья, хвоя и корни, происходит обеднение биогеоценоза элементами минерального питания, особенно азотом, которым очень бедны подзолистые почвы. Значение емкости биологического круговорота позволяет правильно рассчитать нормы удобрений для последующего восстановления леса.

Количество углерода и азота в фитомассе колеблется в широких пределах и определяется рядом факторов: зональностью, лесообразующей породой, экологическими условиями, возрастом насаждений, составом растений напочвенного покрова.

Химический состав растений зависит от их природы, избирательной способности и от почвенных условий. Анализ литературных данных (Ремезов и др., 1959; Молчанов, 1964; Родин, Базилевич, 1965; Поздняков и др., 1969; Кылли, Кяхрик, 1970; Говоренков, 1972; Казимиров и др., 1977; Митрофанов, 1977; Морозова, 1991) свидетельствует о большой изменчивости содержания азота в растениях, особенно в их фотосинтезирующих (зеленых) частях, которые отличаются повышенной концентрацией азота. Отмечено, что в растениях на более плодородной почве больше азота.

Хвоя сосны содержит наибольшее количество азота по сравнению с другими частями дерева: минимум ( $1,05\%$ ) — в хвое сосняка вересково-лишайникового, максимум ( $1,26\%$ ) — в хвое сосняка черничного свежего. Это связано с различными экологическими условиями произрастания сосны.

В хвое сосны, растущей в Карелии, концентрация азота значительно ниже по сравнению с хвоей сосняков более западных и южных

районов Европы. По данным В. С. Победова и В. Е. Волчкова (1972), в хвое сосны мшистого типа леса Белоруссии содержится 1,54%, а в хвое сосны вейниково-брусничного — 1,35%. Содержание азота в хвое сосны в условиях Карелии характеризуется примерно такими же показателями, как и у сосны, произрастающей в Сибири (Поздняков и др., 1969).

В ветвях содержание азота примерно в два раза ниже, чем в хвое. Ветви продуктивных насаждений больше обогащены азотом. Из всех частей дерева меньше всего азота в стволовой древесине (0,10–0,15%). В коре его больше, при этом чем продуктивнее насаждение, тем больше в ней азота (0,37–0,41%). Содержание азота в корнях близко к количеству его в ветвях (0,27–0,42%).

Наибольшее количество углерода содержится в стволовой древесине (70–72%) и мало зависит от условий произрастания насаждения. В хвое в различных экологических условиях содержание углерода составляет около 3%. Значительно оно в корнях — 16%.

Следует отметить, что указанные закономерности накопления азота в различных частях дерева сохраняются как в средней, так и в северной подзоне тайги. Однако показатели накопления азота в различных частях сосны, произрастающей в северной тайге, значительно ниже, чем в среднетаежной подзоне.

В напочвенном покрове сосновых лесов Карелии встречается широкий набор растений, принадлежащих к различным семействам и произрастающих в различных экологических условиях. Содержание азота в растениях напочвенного покрова, произрастающих в автоморфных условиях (лишайники, вереск, брусника, толокнянка, черника), колеблется в широких пределах (0,66–1,31%). Наибольшее количество элементов питания сосредоточено в листьях.

Из мхов наиболее богаты азотом зеленые мхи (0,85–1,39%). Политриховые мхи беднее им (0,88–1,16%). В сфагновых мхах содержание азота среднее между зелеными и политриховыми мхами. Травянистые растения (вейник, луговик и осока) богаты азотом (около 1%). Исследования показали, что на более плодородных почвах растения богаче элементами-органогенами, в том числе и азотом (Морозова, 1991).

При изучении процессов накопления азота в различных частях фитомассы сосны установлено, что наибольшие его запасы сосредоточены в древесине, по мере нарастания производительности насаждения разница в накоплении азота в хвое и древесине возрастает в пользу древесины. Максимальное различие — в сосняке черничном свежем, затем, по мере увеличения уровня увлажнения почвы, эта разница сокращается (табл. 7).

Таблица 7

Количество углерода и азота в фитомассе средневозрастных сосновых насаждений экологического ряда по увлажнению в среднетаежной подзоне Карелии, кг · га<sup>-1</sup>

Тип леса	Часть насаждения	C	N
Сосняк вересково- лишайниковый	<i>Древостой</i>	43670	147,6
	хвоя (листья)	2230	49,6
	кора	5440	23,1
	древесина	36000	74,9
	<i>Напочвенный покров</i>	1840	31,5
	Н а с а ж д е н и е	45510	179,1
Сосняк брусничный	<i>Древостой</i>	49770	178,4
	хвоя (листья)	2230	51,6
	кора	6000	25,5
	древесина	41540	101,3
	<i>Напочвенный покров</i>	1670	32,6
	Н а с а ж д е н и е	51440	211,0
Сосняк черничный свежий	<i>Древостой</i>	65670	253,0
	хвоя (листья)	2470	64,0
	кора	7385	34,9
	древесина	55815	154,1
	<i>Напочвенный покров</i>	2360	59,6
	Н а с а ж д е н и е	68030	312,6
Сосняк черничный влажный	<i>Древостой</i>	56350	222,9
	хвоя (листья)	2215	59,6
	кора	6410	33,5
	древесина	47725	129,8
	<i>Напочвенный покров</i>	3590	82,5
	Н а с а ж д е н и е	59940	305,4
Сосняк кустарничково- долгомошный	<i>Древостой</i>	41310	167,1
	хвоя (листья)	2020	49,1
	кора	5100	27,7
	древесина	34190	90,2
	<i>Напочвенный покров</i>	4100	90,1
	Н а с а ж д е н и е	45410	257,2
Сосняк багульниково- сфагновый	<i>Древостой</i>	37940	141,2
	хвоя (листья)	1950	45,9
	кора	4800	19,4
	древесина	31190	75,9
	<i>Напочвенный покров</i>	4600	96,1
	Н а с а ж д е н и е	42540	237,3

Основные запасы азота заключены в древостое, а в напочвенном покрове автоморфного ряда его запасы в 4–5 раз меньше. В переувлажненных сосняках эта разница уменьшается, и запасы азота в напочвенном покрове меньше, чем в древостое, в 1,5–2 раза.

В зависимости от условий местообитания количество азота в насаждении в целом возрастает с увеличением почвенного плодородия от сосняка вересково-лишайникового ( $179 \text{ кг} \cdot \text{га}^{-1}$ ) до сосняка черничного (312,6). Затем с увеличением гидроморфности почв общие запасы азота постепенно убывают и в сосняке багульниково-сфагновом составляют  $237,3 \text{ кг} \cdot \text{га}^{-1}$ .

В зональном ряду запасы углерода и азота в сосняках среднетаежной подзоны превышают в 2–2,5 раза содержание его в северной тайге в тех же типах леса при одинаковом возрасте древостоя (табл. 8).

Таблица 8

Запасы углерода и азота в различных частях сосновых насаждений в северной и среднетаежной подзонах Карелии,  $\text{кг} \cdot \text{га}^{-1}$

Тип леса, возраст, лет	Древостой	Хвоя	Древесина	Корни	Напочвенный покров	Итого
Средняя тайга						
Сосняк черничный, 160	<u>94700</u> 791	<u>3780</u> 84	<u>79630</u> 582	<u>11290</u> 125	<u>3130</u> 57	<u>97830</u> 848
Северная тайга						
Сосняк чернично-вороничный, 160	<u>34230</u> 258	<u>1620</u> 48	<u>27700</u> 209	<u>4910</u> 38	<u>4620</u> 59	<u>38850</u> 317

Примечание. В числителе — углерод, в знаменателе — азот.

Количество азота в фитомассе сосняков растет до 120–140 лет. По данным Н. И. Казиминова и др. (1977), в сосняках черничных от 20 до 160 лет запас азота возрастает от 181 до  $868 \text{ кг} \cdot \text{га}^{-1}$ .

### Еловые леса

По данным Н. И. Казиминова и Р. М. Морозовой (1973), показатели общей фитомассы в средневозрастных еловых насаждениях свидетельствуют, с одной стороны, о значительном запасе в них органического вещества, а с другой — о большой изменчивости его величины в зависимости от типа леса. В ельнике брусничном, отличающемся наименьшей производительностью в рассматриваемом экологическом ряду, общая масса органического вещества в растущих растениях составляет 56,9 т сухого вещества на 1 га. В наиболее производительном ельнике кисличном масса органического вещества равна 106,5 т



на 1 га, что почти в 2 раза больше. Большая изменчивость запаса фитомассы насаждений по типам леса определяется, в основном, различной массой органического вещества древостоя.

Доля массы растений напочвенного покрова в общей фитомассе насаждений не превышает 8%, а в ельнике кисличном — 1%. Расчеты показывают, что с повышением производительности ельников на I класс бонитета общая масса органического вещества растений увеличивается в среднем на  $1,7 \text{ т} \cdot \text{га}^{-1}$ . В связи с типами леса изменяется соотношение массы отдельных частей древостоя. В целом по мере повышения производительности насаждений уменьшается доля массы хвои, ветвей и корней и увеличивается доля массы стволов в общей фитомассе древостоя.

Исследования показали, что величина общей массы всех растений напочвенного покрова в средневозрастных ельниках находится в обратной связи с количеством массы древесного яруса. Чем больше запас органического вещества в древостое, тем меньше масса напочвенного растительного покрова.

В процессе многолетнего роста еловых насаждений значительная часть органической массы в них закрепляется в виде древесины стволов, сучьев и корней, коры, хвои и различных видов растений напочвенного покрова. Общая масса этого запаса непрерывно возрастает до 140–150 лет, после чего в связи с наступлением этапа разрушения стареющего древостоя постепенно уменьшается. Содержание азота в общей хвое варьирует по типам леса от 0,96 до 1,21% от веса сухого вещества, закономерно повышаясь с увеличением производительности насаждений (табл. 9). Химический анализ ветвей показал, что содержание азота в них в 2,5–3 раза меньше, чем в хвое. В то же время выявлено колебание его количества в зависимости от экологических условий произрастания растений.

Напочвенный покров в ельниках представлен разными видами растений. В числе их широко распространены брусника, черника,

Таблица 9

Содержание азота в различных частях ели в зависимости от экологических условий, %

Тип леса	Хвоя общая	Ветви	Древесина	Корни
Ельник брусничный	0,96	0,45	0,21	0,31
Ельник черничный	1,04	0,48	0,22	0,33
Ельник чернично-кисличный	1,13	0,53	0,23	0,38
Ельник кисличный	1,21	0,56	0,23	0,39
Ельник долгомошный	0,94	0,47	0,22	0,37
Ельник болотно-травяной	1,18	0,59	0,23	0,37

зеленые мхи, мелкотравье, злаки и лишайники, содержание азота в которых довольно различно. В зависимости от условий местопрорастания содержание азота в них сильно варьирует. Значительно обогащены азотом папоротники и мелкотравье, много его в таволге и элодее, в 2 раза больше, чем в хвое ели. В целом следует отметить довольно высокое содержание азота в растениях напочвенного покрова по сравнению с отдельными частями древостоя ели.

Количество азота в фитомассе средневозрастных еловых насаждений (табл. 10) относительно высокое и колеблется в эдафо-фитоцено-тическом ряду от 231 кг · га<sup>-1</sup> в ельнике брусничном до 490 в ельнике кисличном для автоморфных условий и от 216 до 280 кг · га<sup>-1</sup> в переувлажненных типах еловых лесов. Это связано с запасом фитомассы и содержанием азота в ней, которые определяются плодородием почвы.

Таблица 10

Запасы азота в фитомассе средневозрастных еловых насаждений, кг · га<sup>-1</sup>

Тип леса	Хвоя	Ветви	Стволы	Корни	Древо-стой	Напочв. покров	Итого
Ельник брусничный	78,62	39,45	60,90	31,11	210,08	21,29	231,37
Ельник черничный	106,0	53,25	116,04	49,11	324,40	19,96	344,36
Ельник чернично-кисличный	113,65	63,58	135,62	69,04	381,89	17,66	399,55
Ельник кисличный	151,44	74,50	170,63	97,50	476,07	14,37	490,44
Ельник долгомошный	61,20	32,76	46,20	29,82	169,98	46,63	216,61
Ельник болотно-травяной	88,50	48,47	59,80	34,69	231,46	49,0	280,46

Древостой насаждений содержит основную часть (от 79 до 99%) азота. Количество азота в нем колеблется в зависимости от типа леса. В менее продуктивных насаждениях основная масса азота концентрируется в хвое, в более продуктивных — в стволовой части древостоя.

В автоморфной части экологического ряда запасы азота в напочвенном покрове выше в ельниках меньшей продуктивности. Наибольшие его запасы заключены в растениях напочвенного покрова переувлажненных почв.

## 4.2. Запасы углерода и азота в почвах

### Подстилки сосновых лесов

Запасы и химический состав лесных подстилок определяются многими факторами, ведущими из которых являются компонентный и химический состав, масса и интенсивность разложения растительного опада.

Лесные подстилки являются продуктом функционирования лесных биогеоценозов и регулируют целый ряд процессов, протекающих в почве. На большую роль лесных подстилок в почвообразовании указывали Н. Н. Степанов (1932), Г. Ф. Морозов (1970). Влияние состава и степени разложения лесных подстилок на плодородие почв рассматривали в своих работах А. Г. Трутнев и А. Н. Скрипкина (1947), В. С. Шумаков (1948), А. П. Травлев (1960), И. И. Смольянинов (1969), Р. К. Кылли, М. Ингермаа (1970), Р. К. Кылли (1980) и др. В Карелии изучению запаса и свойств лесных подстилок посвящены работы В. Д. Зайцева (1962), Т. И. Левкиной и Ф. С. Яковлева (1965), Н. В. Егоровой (1968), Р. М. Морозовой (1974), в которых показано влияние типа леса на запас подстилок и химический состав их органического вещества. Сведения, касающиеся запаса, компонентного и химического состава подстилок, содержатся в работах Н. И. Казиминова и др. (1977), Р. М. Морозовой, Н. Г. Федорца (1992).

Химический состав растительного опада зависит от его компонентного состава, который определяется структурой фитомассы насаждений. По мере старения отдельных органов растений изменяется их зольный состав, а также содержание азота. Так, в хвое сосны с увеличением продолжительности жизни происходит, наряду с другими элементами питания, отток азота. Подобные данные получены для хвои и побегов ели (Паршевников, 1959; Морозова, 1971; и др.). В подстилках в результате процессов минерализации и гумификации химический состав компонентов опада изменяется еще значительно. В верхнем слое подстилки L происходит возрастание содержания азота. Содержание азота в хвое сосны увеличивается от 0,71% в опавшей до 1,19% в горизонте F (табл. 11).

Нужно отметить, что происходит относительное обогащение органического вещества хвои, но запасы органической массы значительно падают, поэтому количество химических элементов уменьшается. Кора по мере ее минерализации обогащается азотом, так же как и шишки. Отмершие зеленые мхи содержат в два раза меньше азота, чем живые.

Лесная подстилка является гетерогенным образованием. В зависимости от условий произрастания леса выделяют 2–3 слоя лесной подстилки. Слой L — самая верхняя часть подстилки, состоящая из слабо метаморфизованных растительных остатков, рыхлая и хорошо отделяется от более разложившихся слоев. Слой F — более темный, растительные остатки измельчены, но еще можно их идентифицировать. В этом горизонте много корней деревьев и кустарничков. Слой H — темный, растительные остатки хорошо разложившиеся, выделяются только кора и шишки, которые разлагаются медленно.

Таблица 11  
Содержание азота в компонентах лесных подстилок  
сосновых лесов, %

Компонент подстилки	Тип леса	Слой	N
Хвоя	Вересковый	L	0,514
	Брусничный	L	0,771
	Черничный свежий	L	0,976
		F	1,451
	Черничный влажный	L	0,924
	Багульниково-сфагновый	L	1,016
		F	0,820
Ветви	Вересковый	L	0,885
	Брусничный	L	1,028
	Черничный свежий	L	0,741
		F	1,190
	Черничный влажный	L	0,770
		F	0,920
	Багульниково-сфагновый	L	0,831
Кора	Вересковый	L	0,678
	Брусничный	L	0,671
	Черничный свежий	L	0,847
		F	1,282
	Черничный влажный	L	1,150
		F	0,823
	Багульниково-сфагновый	L	0,708
		F	0,946
Шишки	Вересковый	L	1,109
	Брусничный	L	0,770
		F	0,955
Листья разные	Вересковый	L	0,78
	Брусничный	L	1,478
	Черничный свежий	L	2,051
		F	1,340
	Черничный влажный	L	1,625
Древесина	Вересковый	L	0,768
	Черничный	F	0,801
Зеленый мох	Брусничный	L	1,480
	Черничный	L	1,677
	Багульниково-сфагновый	L	0,850
Политрихо-вые мхи	Вересковый	L	0,930
	Черничный влажный	L	0,878
		F	0,692
	Багульниково-сфагновый	L	1,233
		F	1,066
Сфагнум	Черничный влажный	L	1,388
		F	1,388
	Багульниково-сфагновый	L	1,007
		F	1,007

Подстилка насыщена тонкими сосушими корнями. Выделяется переходный горизонт (A0A1(A2)), в котором органическое вещество хорошо разложившееся, содержит до 80% минеральных частиц.

Компонентный состав лесных подстилок зависит от типа леса, возраста древостоя, интенсивности минерализации растительного опада.

В подстилках сосняков можно выделить следующие компоненты: хвоя, листья, ветви, кора, шишки, мхи, угли, измельченные растительные остатки (мелочь). Видовой состав листьев и мхов зависит от типа леса.

Основную часть лесных подстилок составляют измельченные растительные остатки. В слое L содержание мелочи 43–78%, а в нижнем H увеличивается до 98%. В насаждениях, развитых в полугидроморфных и гидроморфных условиях, 23–41% от веса подстилки приходится на долгомошные и сфагновые мхи. В подстилках автоморфных почв зеленые мхи присутствуют в небольшом количестве.

Максимальное количество хвои (15%) отмечено в подстилках сосняка брусничного, с увеличением увлажнения доля хвои в подстилках уменьшается до 2%. Во всех подстилках присутствуют листья кустарничков (1–2%), видовой состав листьев разный и определяется составом леса. В сосняке вересковом преобладают листья вереска и толокнянки, в заболоченных лесах — листья багульника, голубики, кассандры, а в подстилках брусничных и черничных — соответственно листья брусники и черники. Остатки лишайников присутствуют только в подстилках сосняков вересковых. Несмотря на небольшое количество ежегодного опада коры и шишек, в подстилках их накапливается до 1,7–2,7 т · га<sup>-1</sup> вследствие медленной минерализации. Химический состав лесных подстилок зависит от компонентного состава опада, который определяется структурой фитомассы насаждений. По мере старения отдельных органов растений изменяется их химический состав. В подстилках процесс минерализации и гумификации протекает довольно интенсивно, поэтому химический состав претерпевает дальнейшие изменения. Химический состав лесных подстилок неоднороден в различных слоях. По мере увеличения минерализации растительного материала содержание азота в слоях подстилки сосняков, произрастающих в условиях нормального увлажнения, возрастает, в более влажных условиях — наоборот.

Мощность лесной подстилки зависит от типа леса и находится в прямой зависимости от влажности почв. Минимальная мощность подстилки в сосняке вересковом 1,5 см, она колеблется от 0,5 до 2,5 см. По мере увеличения влажности почв мощность лесной подстилки возрастает. В сосняке брусничном средняя мощность подстилки 3 см,



пределы колебания от 1 до 5,5 см. В сосняке черничном свежем средняя мощность подстилки 4 см (колеблется от 3 до 13 см), в черничном влажном — 10 (7–30 см), кустарничково-долгомошном — 20 (7–22 см) и багульниково-сфагновом — 15 (7–20 см). Лесную подстилку в сосняке багульниково-сфагновом выделить сложно, так как почва развилась на торфах, поэтому к лесной подстилке условно относят сфагновый очес (мертвая часть мха) с большим включением опавшей хвои, листьев кустарничков и ветвей.

В пределах одного типа леса мощность лесной подстилки очень изменчива и обусловлена строением древостоя. Минимальная мощность во всех насаждениях отмечается у стволов сосны и в микровпадинах (табл. 12).

Таблица 12

Мощность лесных подстилок в сосновых лесах (средние данные,  $n = 50$ ), см

Тип леса	Местоположение					
	У ствола	1 м от ствола	2 м от ствола	«Окно»	Микро-западина	Среднее
Сосняк вересковый	2,5	1,0	1,5	1,5	1,5	1,5
Сосняк брусничный	5	3	4	2	—	3
Сосняк черничный свежий	9	6	7	3	—	5
Сосняк черничный влажный	20	11	12,5	10	15,5	10
Сосняк кустарничково-долгомошный	19	11	—	13,5	13	20
Сосняк багульниково-сфагновый	14,5	9	10	8	17	15

Запас лесных подстилок находится в прямой зависимости от вида почвы и типа леса (табл. 13). Несмотря на пестроту мощности лесных подстилок внутри одного типа леса, связанную с микрорельефом и парцеллярным строением напочвенного покрова (Карпачевский, 1977; Морозова, Федорец, 1992), выявлена определенная зависимость массы подстилки от экологической группы почв.

Повышенный запас лесных подстилок отмечается в слаборазвитых почвах сосняков каменисто-лишайниковых, что связано с хорошим развитием мохово-лишайникового покрова в данных лесах, а также с высокой зольностью подстилок, обусловленной большим количеством минеральных частиц.

Этим же можно объяснить довольно высокий запас лесных подстилок в поверхностно-подзолистых почвах, вес которых больше, чем в подзолах железистых, хотя мощность подстилок в последних выше. По запасу же органической массы подстилок поверхностно-

подзолистые почвы и подзолы железистые близки. По мере увеличения гидроморфности почв от подзолов железистых к торфянистым подзолам иллювиально-гумусовым запас подстилки возрастает более чем в три раза. Лесные подстилки подзолистых почв по запасу близки к подзолам иллювиально-гумусово-железистым.

Таблица 13

Запас органического вещества и азота в лесных подстилках сосновых лесов

Тип леса, почва	Под- стилка	Органиче- ская масса	Чистая зола	C	N
	т · га <sup>-1</sup>			кг · га <sup>-1</sup>	
Сосняк лишайниковый, примитивная	41,6	36,19	1,03	10000	270
Сосняк вересково-лишайниковый, поверхностно-подзолистая	27,07	22,78	0,54	8800	210
Сосняк брусничный, подзол иллювиально-железистый	19,68	18,08	0,47	8900	190
Сосняк черничный свежий, подзол иллювиально-гумусово-железистый	44,51	34,59	1,06	17600	410
Сосняк черничный влажный, подзол иллювиально-железисто-гумусовый	59,14	50,65	1,70	21800	540
Сосняк кустарничково-долгомошный, торфянистый подзол иллювиально-гумусовый	64,08	62,02	1,65	36400	700
Сосняк багульниково-сфагновый, торфяная переходная	—	—	0,156	29400	580

Запасы азота в лесных подстилках тесно связаны с запасами органического вещества. О причинах, определивших высокие запасы подстилок в сосняках лишайниковых и вересково-лишайниковых, уже говорилось. Здесь же велики и валовые запасы азота (210–270 кг · га<sup>-1</sup>). Если рассматривать экологический ряд по увлажнению, то видим сопряженное увеличение запасов органического вещества и азота. От сосняка брусничного к кустарничково-долгомошному количество общего азота возрастает от 190 до 700 кг · га<sup>-1</sup>. В сосняке багульниково-сфагновом запасы азота снижаются до 580 кг · га<sup>-1</sup>.

### Подстилки еловых лесов

Общая масса органического вещества подстилки 40-летних ельников колеблется от 15,6 до 34,9 т · га<sup>-1</sup>. В автоморфных условиях этот показатель не превышает 19,8 т · га<sup>-1</sup>. Наибольшие запасы подстилки отмечены в гидроморфных местообитаниях — в ельниках долгомошном и особенно — болотно-травяном, что свидетельствует о замедленных темпах минерализации опада в условиях избыточного увлажнения (табл. 14).

Различия интенсивности минерализации лесной подстилки по типам леса наглядно подтверждаются соотношением массы органического вещества в подгоризонтах. В ельниках лишайниково-каменистом и брусничном запас органического вещества в верхнем подгоризонте, несмотря на менее интенсивное пополнение, в 2–3 раза превышает запас его в том же подгоризонте подстилки ельника кисличного. Данное различие еще больше при сравнении массы верхнего слоя подстилки в ельниках долгомошном и кисличном.

Таблица 14

Масса лесной подстилки в 40-летних ельниках, т · га<sup>-1</sup>

Тип леса	L	F	H	Всего
Ельник лишайниково-каменистый	10,1 8,7	8,6 9,7	—	18,7 15,6
Ельник долгомошный	12,1 11,9	7,7 7,6	1,40 1,38	3,38 3,33
Ельник болотно-травяной	He опр.	He опр.	He опр.	6,10 3,49
Ельник брусничный	7,2 7,1	8,4 8,1	3,7 2,8	19,3 18,0
Ельник черничный	5,2 4,8	6,4 6,0	8,2 7,8	19,8 18,6
Ельник чернично-кисличный	4,7 4,6	5,2 5,1	10,7 10,1	20,6 19,8
Ельник кисличный	3,3 3,3	7,3 7,0	9,4 8,7	20,0 19,0

*Примечание.* В числителе — масса подстилки, в знаменателе — масса органического вещества.

Запас лесной подстилки изменяется в течение года, постепенно уменьшаясь с весны до конца лета и значительно возрастая с осени до начала весны. Это явление связано с сезонностью поступления и минерализации опада растительной массы, которые наиболее интенсивно происходят соответственно в марте — апреле и июне — июле. По данным Р. М. Морозовой (Казимиров, Морозова, 1973), в течение двух лет убыль массы подстилки за вегетационный период составляет в ельнике черничном в среднем 3,7 т · га<sup>-1</sup> и в ельнике кисличном — 5,0 т · га<sup>-1</sup>, а поступление органического вещества, включая опад деревьев, соответственно 4,6 и 5,6 т · га<sup>-1</sup> абсолютно сухого вещества.

Содержание азота в лесных подстилках в зависимости от типа леса колеблется от 1,19 до 2,06% (табл. 15) и отражает эдафические условия, с которыми связан видовой состав растений и интенсивность разложения растительного опада.

Больше всего азота содержится в подстилке ельников болотно-травяного (2,06%), долгомошного (1,87%), а из автоморфных — кисличного (1,76%). В ельниках чернично-кисличном и кисличном четко прослеживается процесс обогащения азотом нижних слоев подстилки по мере разложения растительных остатков.

Лесная подстилка средневозрастных еловых насаждений содержит большой запас азота, иногда превышающий количество его в живой

части биогеоценоза (см. табл. 15). В зависимости от запаса органического вещества количество азота в подстилке колеблется от 231 до 1236 кг · га<sup>-1</sup>. Максимальный запас его отмечен в подстилке ельника

Таблица 15

Содержание азота в лесной подстилке 40-летних ельников

Тип леса	L	F	H	Всего	L	F	H	Всего
	%				кг · га <sup>-1</sup>			
Ельник лишайниково-каменистый	1,68	1,62	—	1,65	169,92	140,31	—	310,23
Ельник долгомошный	1,87	1,87	1,87	1,87	225,34	144,74	262,92	633,0
Ельник болотно-травяной	He	He	He	He	He	He	He	He
Ельник брусничный	опр.	опр.	опр.	2,06	опр.	опр.	опр.	1236,0
Ельник черничный	0,74	1,52	1,36	1,19	53,4	127,84	49,49	230,76
Ельник чернично-кисличный	1,45	1,55	1,47	1,47	74,68	68,84	120,12	263,64
Ельник кисличный	1,50	1,67	1,64	1,62	69,75	86,17	176,14	332,06
Ельник кисличный	1,60	1,79	1,97	1,76	52,80	131,17	167,91	351,98

болотно-травяного, где масса органического вещества в 2–3 раза больше, чем в других типах леса. Для почв автоморфного ряда характерно увеличение запаса азота в лесной подстилке по мере возрастания их плодородия. Запас азота в подстилке возрастает от верхних горизонтов к нижним. Данная закономерность особенно ярко выражена в подстилке высокопроизводительных насаждений, где минерализация органического вещества идет быстрее.

### Почвы

Накопление, состав и свойства гумуса зависят от природных факторов гумусообразования и тесно связаны с типом леса. Повышенная влажность, сравнительно низкие температуры, кислая реакция почвы, поверхностное поступление древесного опада, богатого воско-смолами, тормозящими микробиологическую деятельность, способствуют формированию фульватного гумуса и своеобразному распределению его по профилю (Морозова, 1958, 1959; Куликова, Егорова, 1965; Морозова, Федорц, 1992).

Подзолистые и болотно-подзолистые песчаные почвы сосновых лесов бедны органическим веществом. Для них характерно накопление органического вещества на поверхности почвы в виде лесной подстилки, в которой может быть сосредоточено до 80% общего запаса органического вещества. По мере увеличения увлажнения почв

и усиления иллювиально-гумусового процесса содержание органического вещества в почвах возрастает как за счет массы лесной подстилки, так и за счет накопления его в иллювиальном горизонте.

Содержание общего гумуса в почвах лесных экосистем отличается большой пространственной вариабельностью, связанной с неоднородностью микрорельефа, парцеллярным строением древесного и напочвенного растительного покрова, определяющего поступление, распределение и трансформацию опада.

Органическое вещество подзолистых песчаных и супесчаных почв обладает высокой подвижностью, особенно подвижен гумус иллювиальных горизонтов, где негидролизующий остаток составляет 20–30% от общего гумуса. В подзолистом горизонте органическое вещество еще более подвижно. При обработке почвы слабыми кислотами и щелочами в раствор переходит до 95% гумуса от общего его содержания (Морозова, 1959).

С содержанием органического вещества в почвах тесно связано количество в них азота. Для условий Карелии выявлена тесная зависимость содержания гумуса и азота с типом и родом почв. Установлено, что количество углерода в 50-сантиметровом слое почв (включая подстилку) (табл. 16) увеличивается от 29 т · га<sup>-1</sup> в слаборазвитых почвах до 86 в болотно-подзолистых и 426 в торфяных. По мере увеличения увлажнения почв содержание органического вещества в них возрастает. Количество гумуса в подзолистых почвах и подзолах гумусово-железистых близко, что связано с близкими экологическими условиями,

Таблица 16

Запасы гумуса и азота в почвах сосновых лесов (слой 50 см), т · га<sup>-1</sup>

Тип леса	Почва	C	N
Сосняк лишайниковый	Слаборазвитая	29,7	0,71
Сосняк вересково-лишайниковый	Поверхностно-подзолистая	33,5	1,74
Сосняк брусничный	Подзол иллювиально-железистый	34,4	1,88
Сосняк черничный свежий	Подзол иллювиально-гумусово-железистый	47,1	2,65
Сосняк черничный влажный	Подзол иллювиально-железисто-гумусовый	76,1	2,76
Сосняк кустарничково-долгомошный	Торфянистый подзол иллювиально-гумусовый	85,9	3,82
Сосняк черничный свежий	Подзолистая	48,2	3,85
Сосняк черничный влажный	Подзолистая оглеенная	45,0	2,07
Сосняк багульниково-сфагновый	Торфяная	426,7	9,80



в которых развиваются данные почвы, и близким типом растительности (сосняки черничные свежие, наиболее продуктивные в автоморфном ряду).

Дальнейшее повышение содержания органического вещества в почве связано с дополнительным увлажнением и не способствует увеличению продуктивности древостоев.

По запасам азота в почвах выявлена аналогичная закономерность: по мере увеличения увлажнения от поверхностно-подзолистых почв до торфянистых иллювиально-гумусовых подзолов запас азота в слое 50 см увеличивается от 1,74 до 3,8 т · га<sup>-1</sup>, а в торфяно-болотных — до 9,8 т · га<sup>-1</sup>. Можно считать оптимальными запасы азота в подзолах иллювиально-гумусово-железистых и в подзолистых автоморфных почвах сосняков черничных свежих. Более низкое содержание азота отмечено в подзолистых оглеенных почвах, на которых также произрастают леса черничного типа. Распространение на них черничников связано с дополнительным поступлением элементов питания с почвенно-грунтовыми водами. Основные запасы валового азота сосредоточены в минеральных горизонтах.

Количество органического вещества и связанного с ним азота различно в почвах северной и среднетаежной подзон.

Поверхностно-подзолистые почвы северотаежной подзоны содержат от 32 до 56 т · га<sup>-1</sup> углерода, средней тайги — 22—45, т. е. в этих почвах запасы органического вещества в среднетаежной подзоне в 1,5 раза ниже, чем в северной тайге (табл. 17). Это обусловлено: 1) медленной минерализацией растительного опада в северной тайге; 2) в северной тайге на поверхностно-подзолистых почвах распространены воронично-брусничные и воронично-лишайниковые леса с хорошо развитым моховым покровом, дающим много опада, в то время как

Таблица 17

Влияние зональности на содержание органического вещества и азота в почвах сосновых лесов (слой 50 см)

Почвы	Подзона тайги	C, т · га <sup>-1</sup>	N, кг · га <sup>-1</sup>
Поверхностно-подзолистые	Северная	47,0	2380
	Средняя	32,6	1480
Подзолы иллювиально-железистые	Северная	27,6	1640
	Средняя	44,5	2000
Подзолы иллювиально-гумусово-железистые	Северная	41,2	2500
	Средняя	61,4	3020

в среднетаежной подзоне этих почвах произрастают сосняки лишайниковые и вересково-лишайниковые; 3) в северной тайге данные почвы часто сформированы на грубозернистых песках, в которых сильно развито иллювиальное накопление гумуса.

В подзолах иллювиально-железистых и иллювиально-гумусово-железистых содержание органического

вещества выше в среднетаежной подзоне. Это связано с более высокой производительностью древостоев среднетаежной подзоны, дающих больше опада, который быстро гумифицируется и способствует накоплению гумуса в минеральных горизонтах.

В отношении запасов азота выявлена та же закономерность, что и для гумуса: в поверхностно-подзолистых почвах северной тайги содержание азота выше, чем в среднетаежной подзоне. Подзолы иллювиально-железистые и иллювиально-гумусово-железистые богаче азотом в среднетаежной подзоне, чем в северотаежной. Кроме названных причин, это связано с бедностью азотом растительного опада северотаежных сосновых лесов.

Как уже указывалось, одной из причин вариабельности запасов гумуса и элементов минерального питания в пределах одного подтипа или рода почв является неоднородность растительного покрова. На почвах одной генетической группы (на уровне рода или вида) могут произрастать леса разных типов. Это явление особенно часто наблюдается на поверхностно-подзолистых почвах и подзолах иллювиально-железистых (табл. 18). К поверхностно-подзолистым почвам среднетаежной подзоны приурочены главным образом сосняки лишайниковые и брусничные. В северной тайге на этих же почвах растут сосняки вересково-лишайниковые, воронично-лишайниковые и воронично-брусничные.

Произрастание лесных насаждений различных типов на одной разновидности почв связано, вероятно, с различными стадиями развития коренных типов леса в данных местообитаниях, а также с нарушением почвенного покрова в результате стихийных бедствий (пожары, ветровал) и деятельности человека (вырубка древостоя) (Морозова, Лазарева, 1979).

С типом лесной растительности тесно связан запас гумуса и элементов минерального питания в почвах, в особенности азота. По мере увеличения продуктивности насаждений от сосняка лишайникового до брусничного запас азота возрастает в 2 раза. Запас гумуса

Таблица 18

Влияние растительности на запасы органического вещества и азота в подзолистых почвах (слой 50 см)

Почвы	Тип леса	C, т · га <sup>-1</sup>	N, кг · га <sup>-1</sup>
Поверхностно-подзолистые	Лишайниковый	22,7	980
	Вересково-лишайниковый	34,0	1340
	Брусничный	39,7	2280
Подзолы иллювиально-железистые	Лишайниковый	18,2	1710
	Толокнянково-вересковый	21,1	1250
	Брусничный	37,5	1880

и азота в подзолах иллювиально-железистых тоже увеличивается от лишайниковых сосняков к брусничным.

В табл. 19 показаны запасы гумуса и азота в почвах ельников на легких (песчаных и супесчаных) почвах, сформировавшихся на морене и на двучленных отложениях, где пески или супеси подстилаются суглинками, и в торфяной почве.

Наименьшие запасы органического вещества содержатся в профиле примитивной почвы ельника лишайниково-каменистого, затем по мере увеличения продуктивности насаждений в автоморфном ряду запасы органического вещества возрастают и достигают максимума в супесчаной пятнисто-подзолистой почве на двучленных отложениях за счет накопления его в горизонте A1A2 ( $50,6 \text{ т} \cdot \text{га}^{-1}$ ). Запас

Таблица 19

Запас гумуса и азота в почвах еловых лесов

Тип леса	Почва	Горизонт, глубина, см	C, т · га <sup>-1</sup>	N, кг · га <sup>-1</sup>
Ельник лишайниково-каменистый	Примитивная слаборазвитая	L 0-1	5,4	230
		F 1-3	4,4	200
		AB 3-15	5,2	150
		Всего	15,0	580
Ельник брусничный	Подзол иллювиально-гумусово-железистый супесчаный на морене	0 0-6	9,4	230
		A2 6-15	10,8	270
		A2B 15-25	14,9	920
		Всего	35,1	1420
Ельник черничный	Подзол иллювиально-гумусово-железистый песчаный на морене	L 0-15	3,2	130
		F 0-2	7,6	270
		A1A2 4-7	2,8	220
		A2 7-15	3,7	210
		B1 15-25	8,5	760
		Всего	25,8	1590
Ельник чернично-кисличный	Супесчаная пятнисто-подзолистая на морене	L 0-1	2,9	100
		F 1-3	6,2	230
		A1A2 3-12	3,7	1150
		A2 12-25	3,4	150
		Всего	4,9	1630
Ельник кисличный	Супесчаная пятнисто-подзолистая на двучлене	L 0-2	6,2	150
		F 2-4	6,5	170
		A1A2 4-15	50,6	2510
		B1 15-25	8,1	530
		Всего	71,4	3360
Ельник болотно-травяной	Торфяно-перегнойно-глеевая на двучлене	AT0 0-5	22,2	1240
		AT1 15-20	96,8	5060
		AT2 20-25	42,5	18800
		Всего	161,5	25100
Ельник долгомошный	Торфяная переходная	T0 0-10	19,7	940
		T1 10-20	31,3	1710
		T2 20-25	18,1	1130
		Всего	69,1	3780

органического вещества в переувлажненных почвах велик, но продуктивность древостоев на этих почвах определяется водно-воздушным режимом. Высокое содержание в лесной подстилке веществ типа воскосмол тормозит процессы минерализации и гумификации.

Особенно высокое их количество отмечается в грубогумусных подстилках ельников брусничных. Наиболее благоприятные условия для микробиологической деятельности складываются в ельнике кисличном, где в подстилке повышенное содержание азота и пониженное — воскосмол, а в составе гумуса повышенное содержание гуминовых кислот. Все это приводит к обогащению гумусом минеральных горизонтов почвы и образованию гумусово-аккумулятивного горизонта A1A2, кроме того, в ельниках чернично-кисличном и кисличном, несмотря на большее количество поступающего опада, не образуется мощной лесной подстилки. Элементы минерального питания быстро высвобождаются и вовлекаются в биологический круговорот. В результате лесные насаждения отличаются высокой продуктивностью.

Органическое вещество торфяных почв по составу резко отличается от гумуса лесной подстилки и минеральных горизонтов подзолистых почв. В условиях избыточного увлажнения идут процессы консервации растительного опада.

Запас азота и его распределение по профилю тесно связаны с содержанием органического вещества. С увеличением его количества в почве увеличивается и запас азота. По данным Р. М. Морозовой (Казимиров, Морозова, 1973), в почвах автоморфного ряда содержание азота возрастает от ельника брусничного к кисличному от 1,4 до 3,3 т · га<sup>-1</sup>. Основные запасы сосредоточены в минеральных горизонтах и составляет около 1,2 т · га<sup>-1</sup>, увеличиваясь в ельнике кисличном в 2 раза. Особенно богаты азотом горизонты A1A2 в пятнисто-подзолистых почвах ельников чернично-кисличного и кисличного (1,1—2,5 т · га<sup>-1</sup>) за счет высокого его содержания и значительной мощности горизонта. В торфяных почвах запасы азота выше, чем в подзолах (3,78—25,1 т · га<sup>-1</sup>).

В целом следует отметить, что подзолистые почвы еловых лесов содержат недостаточное количество азота для питания древесных растений, о чем свидетельствуют опыты с азотными удобрениями, повышающими продуктивность древостоев, о чем будет сказано в главе 8.

## Выводы

Запасы азота в сосновых и еловых биогеоценозах складываются из запасов их в фитомассе древостоя, растениях напочвенного покрова, лесных подстилках и минеральных горизонтах почв.

Запасы азота в фитомассе древостоя определяются запасами и составом фитомассы и содержанием в ней азота, которые, в свою очередь, связаны с зональными особенностями произрастающих насаждений, лесообразующей породой, экологическими условиями, возрастом насаждений.

Хвоя сосны содержит наибольшее количество азота по сравнению с другими частями дерева. В зависимости от продуктивности древостоя здесь накапливается от 0,84 до 1,67% азота.

В ветвях азота в 2 раза меньше, чем в хвое, меньше всего азота в стволовой древесине (в три раза меньше, чем в хвое).

Содержание азота в корнях близко к содержанию его в ветвях. Запасы азота в различных частях фитомассы древостоя различные, но наибольшие — в стволовой древесине ( $6 \text{ кг} \cdot \text{га}^{-1}$ ) в связи с ее большой массой.

Зональные особенности накопления азота в фитомассе древостоя сосняков выражаются в меньшем его количестве на севере и увеличением в средней тайге в 2–2,5 раза. Количество азота в фитомассе древостоя увеличивается с увеличением продуктивности насаждения, в экологическом ряду от сосняка лишайникового ( $98,8 \text{ кг} \cdot \text{га}^{-1}$ ) к сосняку черничному свежему ( $253,0 \text{ кг} \cdot \text{га}^{-1}$ ). В дальнейшем с нарастанием степени увлажнения почвы запасы азота начинают уменьшаться.

Запасы азота в фитомассе напочвенного покрова в первую очередь зависят от его состава. Богаты азотом черника, голубика, багульник, зеленые мхи, брусника; беднее — политриховые и сфагновые мхи, лишайники. В одних и тех же растениях, произрастающих на почвах, отличающихся по плодородию, содержание азота изменчиво.

В целом запасы азота в фитомассе сосновых лесов увеличиваются с возрастом от 20 до 160 лет в высокопродуктивных сосняках черничных свежих от 181 до  $868 \text{ кг} \cdot \text{га}^{-1}$ . В зональном ряду запасы азота в фитомассе насаждения выше в среднетаежной подзоне, чем в северной тайге, так, в спелых сосняках черничных они составляют соответственно 848 и  $354 \text{ кг} \cdot \text{га}^{-1}$ , в низкопроизводительных насаждениях (брусничный и лишайниковый типы леса) — 569 и  $382 \text{ кг} \cdot \text{га}^{-1}$ . В экологическом ряду с увеличением уровня увлажнения почвы запасы азота в фитомассе насаждения (древесный и напочвенный покров) возрастают от сосняка лишайникового ( $126 \text{ кг} \cdot \text{га}^{-1}$ ) до сосняка черничного ( $312 \text{ кг} \cdot \text{га}^{-1}$ ), с нарастанием степени гидроморфности почв снижаются и составляют в сосняке кустарничково-долгомошном  $257 \text{ кг} \cdot \text{га}^{-1}$ .

Хвоя ели, так же как и сосны, наиболее богата азотом по сравнению с другими частями дерева, в ней содержится, в зависимости от



производительности насаждений, от 0,9 до 1,21%, в ветвях и корнях — в 2–3 раза меньше. Ниже всего относительное содержание азота в стволовой древесине.

В менее производительных древостоях ели запасы азота наибольшие в хвое, а с ростом производительности — в стволовой древесине. С возрастом древостоя запасы азота в нем увеличиваются, так, в ельнике черничном от 22 до 138 лет происходит накопление азота в древостое от 142 до 732 кг · га<sup>-1</sup>.

В растениях напочвенного покрова запасы азота убывают от менее к более производительным насаждениям в связи с уменьшением фитомассы.

В целом запасы азота в фитомассе средневозрастных еловых насаждений возрастают с повышением их производительности от 157 до 490 кг · га<sup>-1</sup>. Наибольшие запасы азота накапливаются в наиболее производительных ельниках кисличных. В высокопроизводительных ельниках черничных от 22 до 138 лет запасы азота возрастают от 160 до 794 кг · га<sup>-1</sup>.

Запасы азота в лесных подстилках связаны с количеством в них органического вещества и содержанием в нем азота. Они определяются возрастом насаждений, типом леса, от которых, в свою очередь, зависит количество опада и условия его разложения.

Запасы лесных подстилок тесно связаны с условиями увлажнения и по мере нарастания гидроморфности почв возрастают. В старых насаждениях запасы органического вещества подстилок выше, чем в молодых и средневозрастных. Содержание азота в подстилках связано с их компонентным составом, определяемым типом леса. Если подстилки сложены растительными остатками древостоя и растений напочвенного покрова, богатых азотом, то и количество азота в лесных подстилках будет выше.

В экологическом ряду по мере увеличения степени увлажнения запасы азота в подстилках возрастают параллельно с запасами органического вещества от сосняков брусничных к соснякам кустарничково-долгомошным, т. е. от подзолов иллювиально-железистых к торфянистым подзолам иллювиально-гумусовым, от 190 до 700 кг · га<sup>-1</sup>.

Лесная подстилка средневозрастных еловых насаждений в зависимости от запаса органического вещества содержит от 231 до 1236 кг · га<sup>-1</sup> азота. Максимальный запас азота в подстилке отмечен в ельнике болотно-травяном, отличающемся высокими запасами органического вещества и содержанием в нем азота.

Для почв автоморфного ряда характерно увеличение запаса азота в подстилке с ростом их плодородия от ельника брусничного к кисличному, где минерализация органического вещества идет быстрее,

однако подстилки лесных почв, сформировавшихся на песчаных и супесчаных отложениях, обеднены азотом.

Накопление азота в почвах тесно связано с содержанием в них органического вещества. Выявлена тесная зависимость содержания гумуса и азота в почвах на уровне типа и рода. По мере увлажнения почв содержание органического вещества в них возрастает. По запасам азота выявлена аналогичная закономерность в сосновых лесах: по мере увеличения увлажнения от поверхностно-подзолистых до торфянистых иллювиально-гумусовых подзолов запас азота в слое 50 см увеличивается от 1,7 до 3,8 т · га<sup>-1</sup>, а в торфяно-болотных — до 9,8 т · га<sup>-1</sup>. Оптимальными по запасу азота можно считать подзолы иллювиально-гумусово-железистые (2,6–2,7 т · га<sup>-1</sup> N) и подзолистые почвы сосняков черничных свежих (3,85), где древостои характеризуются максимальной продуктивностью. Основные запасы азота сосредоточены в минеральных горизонтах почв.

Выявлено, что в подзолах одного рода в северной и средней тайге запасы азота различаются. Поверхностно-подзолистые почвы северной тайги богаче азотом, чем средней (соответственно для 50-сантиметрового слоя — 2,38 и 1,48 т · га<sup>-1</sup>), в связи с большей обогащенностью северных разновидностей органическим веществом. Более плодородные иллювиально-железистые и иллювиально-гумусово-железистые подзолы богаче азотом в среднетаежной подзоне (в северной тайге 1,64 и 2,5; в средней 2,0 и 3,02 т · га<sup>-1</sup>).

В почвах еловых лесов также запасы азота тесно связаны с запасом в них гумуса. В почвах автоморфного ряда содержание азота возрастает от ельника брусничного к кисличному (от 1,4 до 3,3 т · га<sup>-1</sup>), т. е. запасы азота в пятнисто-подзолистых супесчаных, сформированных на двучленных отложениях почвах выше, чем в подзолах иллювиально-гумусово-железистых песчаных на морене. В переувлажненных почвах запасы азота еще выше и составляют 25,1 т · га<sup>-1</sup> в торфяно-перегнойной глеевой на двучлене. Однако здесь лимитирующим фактором продуктивности древостоя является избыточное увлажнение.

## Глава 5

### СОСТАВ ОРГАНИЧЕСКОГО ВЕЩЕСТВА ПОЧВ

#### 5.1. Роль почвенной фауны и микробиоты в трансформации органического вещества почв

Источниками органической части почвы являются органические остатки, поступающие в нее. В исследованных нами ненарушенных лесных почвах к ним относятся растительные остатки, отмершие почвенная фауна и микроорганизмы. Определить биомассу микроорганизмов, выступающих в качестве гумусообразователей, довольно проблематично. Как отмечала Т. В. Аристовская (1975), оценить сезонную или годовую продукцию биомассы микроорганизмов не представляется возможным из-за недостаточной точности методов ее определения. Численность микроорганизмов зависит от многих факторов: типа почвы, гидротермического режима, характера растительности, поэтому очень изменчива. Особенно сильно она варьирует в северных районах. Т. В. Аристовская (1975) приводит данные по дерново-подзолистой суглинистой почве на Карельском перешейке, где пределы колебаний численности микроорганизмов — от 0,7 до 15,0 млрд · г<sup>-1</sup>. По мнению многих исследователей (Тюрин, 1946; Красильников, 1958; Ковда, 1973), биомасса сухого вещества микроорганизмов в годовом цикле не превышает 1–2 т · га<sup>-1</sup>. В почвах, бедных гумусом, она составляет 1–2% от общего запаса гумуса.

Биомасса почвенной фауны оценивается также достаточно условно как вследствие неточности методов подсчета и определения массы, так и благодаря сложным взаимодействиям почвенной фауны и микроорганизмов. По данным Т. В. Аристовской (1975), существенная часть биомассы микроорганизмов потребляется представителями почвенной фауны. Масса органических остатков почвенной фауны может достигать 1,0–1,5 т сухого вещества на 1 га (Ковда, 1973).

Основным источником органического вещества почвы являются растительные остатки, в первую очередь потому, что масса их во много раз превышает массу микроорганизмов и почвенной фауны. Кроме того, последние, как правило, являются вторичными формами и не вносят в почву новых запасов органических веществ.

Трансформация растительных остатков, поступающих в почву, — сложный биохимический процесс. Он протекает при участии атмосферных осадков и ферментов самих растительных тканей, подвергающихся разложению, что обуславливает автолитический распад их компонентов (Аристовская, 1980). Однако значительно большую роль в переработке и разложении опада играют микроорганизмы и почвенные животные. Доля их участия, а также их взаимоотношения зависят от химического состава растительных остатков и условий развития процесса. Роль почвенных животных заключается, прежде всего, в измельчении растительных остатков и, соответственно, в увеличении их удельной поверхности. Таким образом, растительный субстрат становится более доступен для микроорганизмов (Курчева, 1971; Гиляров, Стриганова, 1978). Часто между почвенными животными и микроорганизмами, обитающими в их кишечниках, возникают симбиотические отношения (Козловская, 1974, 1975). В этом случае на растительные остатки в кишечнике беспозвоночного воздействуют ферменты как самого животного, так и микроорганизмов симбионтов.

### Почвенные животные

М. С. Гиляров и Б. Р. Стриганова (1978) выделяют следующие функции почвенных животных: измельчение растительных тканей, что увеличивает их доступность микроорганизмам; расщепление некоторых клеточных включений и целлюлозных компонентов клеточных стенок с помощью собственных ферментов и ферментов микробов симбионтов; соединение образующегося в кишечниках аммиака с лигнином, что ускоряет гумификацию разлагающегося материала; частичная минерализация и гумификация субстрата; перемещение растительных остатков в более глубокие горизонты почвы и перемешивание их с минеральными частицами.

В разложении опада участвует большая группа животных: нематоды, энхитреиды, дождевые черви, клещи, мокрицы, двупарные многоножки, ногохвостки, жесткокрылые, двукрылые, моллюски.

В таежно-лесной зоне в комплексе беспозвоночных преобладают микрофитофаги и детритофаги (табл. 20).

В таежных ландшафтах широко распространены нематоды, энхитреиды, орибатида и коллемболы, значительную часть составляют дождевые черви, двукрылые и диплоподы. В отличие от более южных районов, где деструкция опада идет с активным участием дождевых червей и формируется органофиль типа мулль, в северотаежных и среднетаежных ландшафтах их участие в разложении растительных остатков значительно меньше. Поэтому здесь формируется органо-

профиль типа мор (под лиственными лесами типа модер). Грубогумусные почвы населены в основном мелкими организмами, такими как микроартроподы и энхитреиды, а из мезофауны — личинками двукрылых и в незначительной степени дождевыми червями и диглоподами.

В почвах среднетаежной подзоны по численности первое место занимают нематоды, на втором — панцирные клещи, далее следуют коллемболы, энхитреиды, личинки насекомых и др. (табл. 21). Почвы сосняков являются самыми бедными по численности и биомассе почвенных животных по сравнению с почвами ельников и березняков, что связано, по-видимому, со снижением влажности и повышением кислотности в этих почвах (Ласкова, 1994).

Таблица 20

Состав комплекса беспозвоночных-сапрофагов почв тайги (Стриганова, 1980)

Микрофитофаги	Детритофаги	Фитосапрофаги
Nematoda	Lumbricidae	Bibionidae
Enchytracidae	Enchytracidae	Tipulidae
Oribatei	Diplopoda	Oribatei
Collembola	Elateridae	
	Scarabacidae	
	Tipulidae	

Таблица 21

Состав комплекса почвенных беспозвоночных в сосновых биогеоценозах среднетаежной подзоны (Ласкова, 1994)

Группа	Сосняк брусничный		Сосняк черничный	
	50 лет	165 лет	45 лет	160 лет
Клещи панцирные	<u>20694</u>	<u>36505</u>	<u>25749</u>	<u>22860</u>
	1,96	1,95	1,62	1,49
	<u>3190</u>	<u>3849</u>	<u>4617</u>	<u>2582</u>
	0,64	0,64	0,74	0,43
гамазовые	<u>3294</u>	<u>3140</u>	<u>3390</u>	<u>3070</u>
	0,28	0,26	0,29	0,24
прочие	<u>6106</u>	<u>11329</u>	<u>5548</u>	<u>5110</u>
	0,49	0,69	0,45	0,66
Коллемболы	<u>2194</u>	<u>2828</u>	<u>2514</u>	<u>5420</u>
	0,46	0,80	0,84	1,06
Энхитреиды	<u>33310</u>	<u>18604</u>	<u>18597</u>	<u>43953</u>
	0,03	0,01	0,08	0,04
Пауки	<u>85</u>	<u>170</u>	<u>80</u>	<u>64</u>
	0,06	0,15	0,02	0,015
Личинки насекомых	<u>1012</u>	<u>1604</u>	<u>1452</u>	<u>1612</u>
	0,33	0,80	0,41	0,85
Дождевые черви	<u>57</u>	<u>176</u>	<u>208</u>	<u>300</u>
	0,10	0,07	0,07	0,13
Моллюски	<u>0</u>	<u>0</u>	<u>0</u>	<u>16</u>
	0	0	0	8,4

Примечание. В числителе — численность животных (экз · м<sup>-2</sup>), в знаменателе — биомасса (г · м<sup>-2</sup>).



В северотаежной подзоне население почвы менее разнообразно, снижается численность и биомасса животных. В этих почвах почти исчезают дождевые черви, количество такой многочисленной группы, как клещи, значительно снижается.

В пределах сходной биоклиматической обстановки почвам, различающимся по увлажнению, присущ свой комплекс почвенных животных. Так, с увеличением увлажнения возрастает количество дождевых червей, энхитреид, многоножек, появляются моллюски. Вниз по катене возрастает и биомасса почвенной фауны, в основном за счет дождевых червей. В почвах сосняков абсолютное большинство животных (89,9%) находится в подстилке. Более того, самое многочисленное население оказывается в его листовом подгоризонте. Такая картина характерна для подзолов тайги (Гиляров, 1965).

Анализ деятельности почвенных животных в трансформации растительного материала ясно показывает их многогранную роль в формировании органофила почв. Они разрушают растительные остатки, стимулируют минерализацию и гумификацию опада, увеличивают содержание подвижных элементов. Так как продукты жизнедеятельности животных (копролиты) являются показателем их активности, то соотношение выбросов различной морфологии, растительных остатков и тонкодисперсных компонентов гумуса служит критерием выделения стратотипа гумуса (Шоба, 1988).

### Микроорганизмы

Большую роль в трансформации органического вещества в лесных биогеоценозах играют микроорганизмы. Исследования, проведенные в Карелии (Кацнельсон, Ершов, 1957; Шубин, Данилевич, 1971; Морозова, Данилевич, 1979; Загуральская, 1993; и др.), показали, что почвы сосновых лесов бедны микроорганизмами, в них преобладают бактериально-грибные ценозы. Почвы характеризуются преобладанием среди бактерий олигонитрофилов, малой численностью целлюлозоразрушителей, укороченностью микробного профиля. Микробоценоз развивается соответственно условиям произрастания и в значительной степени определяется составом и возрастом древостоя.

В почвах сосновых биогеоценозов отмечается низкая биогенность в связи с замедленным разложением органического вещества. Это, в свою очередь, обусловлено химическим составом и строением хвои сосны: наличием толстой восковой кутикулы, антибиотических веществ и обогащенностью фенолами (Аристовская, 1980). В результате снижается активность микроорганизмов.

Исследования качественного и количественного состава микрофлоры подзола иллювиально-железистого в сосняке брусничном среднетаежной подзоны показали большую изменчивость в течение вегетационного периода (табл. 22). Общая численность микроорганизмов на протяжении сезона может увеличиваться в 40 раз, что связано с резкими колебаниями гидротермических условий, запаса подвижного органического вещества и элементов минерального питания в железистых подзолах. Эти почвы бедны микроорганизмами как в количественном, так и в качественном отношении. Отсутствуют нитрификаторы, очень незначительно представлены денитрификаторы. Микроорганизмы, разлагающие клетчатку, представлены лишь аэробными формами, приурочены, в основном, к подстилке и активизируются осенью с поступлением свежего органического материала. Наибольшую численность в этих почвах имеют грибы и аммонифицирующие бактерии, сосредоточены они главным образом в подстилке. Летом вследствие высыхания лесной подстилки содержание грибов в ней

Таблица 22

Качественный состав микрофлоры подзола иллювиально-железистого, тыс. · г<sup>-1</sup> почвы

Дата взятия об- разца	Го- ри- зонт	Глу- би- на, см	Общее количе- ство бак- терий на МПА	Аммо- ни- фика- торы	Спо- ровые аммо- нифи- като- ры	Дени- три- фика- торы	Гри- бы	<i>Clostridium pasterianum</i>	Ак- тино- мице- ты	Аэроб- ные целлю- лозо- разла- гающие
Июль, 29	A0	0–3	27,3	975	9,8	2,3	468	9,7	74,1	0,09
	A2	4–7	30,0	300	1,4	0,07	156	0,07	2,4	0,003
	B1	7–15	46,2	66	2,6	0,03	13,2	0,07	0,7	0,002
	B2	30–40	0,8	66	0,2	0,3	20,7	0,03	0,2	Не обн.
Сен- тябрь, 20	A0	0–3	187	132	2,0	1,3	1012	0,60	88	0,6
	A2	4–7	17	25	0,6	0,03	60	0,03	1	Не обн.
	B1	7–15	6	25	0,2	0,003	20	0,003	0,005	Не обн.
Де- кабрь, 20	A0	0–3	1484	70000	0,28	0,7	1064	0,07	84	1,7
	A2	4–7	7,7	660	0,11	0,03	22	Не обн.	1,1	0,03
	B1	7–15	1,1	660	0,06	0,003	66	Не обн.	0,6	Не обн.

*Примечание.* Данные Р. М. Морозовой, В. М. Данилевич (1979). Учет микрофлоры проводился в свежих образцах путем посева на питательные среды. Общее количество бактерий определялось на мясо-пептонном агаре (МПА), спорообразующие бактерии — на смеси МПА и сусло-агаре, грибы — на сусло-агаре, актиномицеты — на крахмало-аммиачном агаре, аммонификаторы — на пептонной воде, *Clostridium Pasterianum* — на стандартной жидкой среде, денитрификаторы — на среде Гильята, целлюлозоразлагающие — на среде Имшенецкого.

уменьшается. Среди аммонификаторов преобладают неспоровые формы, участвующие в первой стадии минерализации органического вещества (Мишустин, 1956). Споровых аммонификаторов, благодаря которым происходит дальнейшее превращение органических веществ, мало, что обуславливает грубогумусный состав лесных подстилок данных почв. Азотфиксирующие бактерии представлены анаэробными формами, численность их невелика. Актиномицеты хорошо развиваются только в подстилке, где много органического вещества.

Основными деструкторами лесных подстилок в хвойных лесах являются микроскопические грибы, которые разлагают до 50–60% органического материала подстилки (табл. 23). В подстилках хвойных

Таблица 23

Структура микробных сообществ и их количественное распределение в почвах разных типов леса среднетаежной подзоны, тыс. · га<sup>-1</sup>

Тип леса	Тип почвы	Генетические горизонты	Бактерии				Микромицеты	Актиномицеты	Целлюлозоразрушающие	Микробная биомасса	
			аммонифицирующие	усваивающие минеральный азот	олигонитрофильные	олиготрофные				С мг · г <sup>-1</sup>	С кг · га <sup>-1</sup>
Сосняк черничный, 165 лет	Подзол иллювиально-железистый песчаный на двучлене	0	1130	2384	7824	458	257	55	1,0	1,09	52,3
		A2	391	858	1152	448	35	—	3,0	0,07	—
Сосняк черничный, 50 лет		0	1204	913	2395	1048	315	18	На 25% грибное разрушение	1,25	42,4
		A2	264	289	764	133	28	6	0,5	0,06	—
Сосняк брусничный, 160 лет		0	190	1392	4600	214	231	85	0,8	1,11	—
		A2	87	563	537	136	59	77	4,3	0,08	—
Сосняк брусничный, 50 лет		0	645	780	2032	625	465	20	8,4	0,97	—
		A2	187	73	173	234	84	—	0,5	0,13	—

Примечание. По данным Л. М. Загуральской, Л. А. Клейн (1994).

лесов длина грибного мицелия в летний период может достигать  $150\text{--}200 \text{ м} \cdot \text{г}^{-1}$ , по биомассе они превосходят бактерии в 26–32 раза (Макарова, Напрасникова, 1984). Поскольку грибы – аэробные организмы, они не проникают глубоко в почву и сосредоточены в основном в подстилке. Роль грибов в деструкции подстилок выше в спелых насаждениях, в молодых лесах возрастает участие бактерий. Существует тесная взаимосвязь между типом леса и биологическим потенциалом почвы. Микробный пул лесных подстилок сосняков значительно беднее по сравнению, например, с почвами еловых лесов. В нем гораздо меньше актиномицетов и целлюлозоразрушителей. Биомасса микроорганизмов (при пересчете на запас подстилки) максимальная в спелом сосняке черничном в связи с большим запасом подстилок (Загуральская, Клейн, 1994).

В северотаежной подзоне в связи с климатическими особенностями, а также физическими и химическими свойствами почвы формируются чрезвычайно малочисленные микробоценозы с крайне ограниченными деятельностью и функциями. Состав их на 56–70% представлен олиготрофной микрофлорой и на 6–18% – микроскопическими грибами (табл. 24).

Таблица 24

Структура микробного ценоза подзолов иллювиально-железистых песчаных в сосняках брусничных северотаежной подзоны, тыс.  $\cdot \text{г}^{-1}$

Объект исследования	Генетический горизонт	Общее число микроорганизмов	Бактерии			Микроскопические грибы	Актиномицеты		КАА МПА
			аммонифицирующие	усваивающие минеральные источники азота	олиготрофные		на минеральной среде	олиготрофные	
180-летний сосняк	0 A2	2835,4 94,9	102,2 5,6	613,8 16,7	1603,8 68,6	515,6 6,0	194,6 0,8	292,0 3,2	6,00 2,98

Примечание. По данным Л. М. Загуральской (1983).

Участие микроорганизмов в биологическом круговороте азота ограничивается процессом аммонификации. Развитие анаэробных азотфиксаторов типа *Clostridium pasterianum* отмечено в единичных случаях. Структурно-функциональная организация почвенной микробиоты определяется условиями экотопа: гидротермическим режимом, аэрацией, количеством органических и минеральных соединений, степенью их доступности, величиной pH. В связи с высокой кислотностью почв сосновых биогеоценозов Карелии и широким отношением C : N, что замедляет минерализацию поступающего

опада, происходит лишь поверхностная его деструкция. В результате формируются грубогумусные лесные подстилки и слабо разложившиеся торфа с низким уровнем минерализации и преобладанием синтеза органических веществ над их распадом.

## 5.2. Биохимический состав лесных почв

Состав органического вещества подстилок хвойных лесов обусловлен составом растительного опада, т. е. типом леса. Для состава их органического вещества характерно высокое содержание негидролизуемого остатка (40–66%) и воскоsmол (6–29%). Гуминовые кислоты преобладают над фульвокислотами. Накопление гуминовых кислот в лесных подстилках связано с более легкой подвижностью фульвокислот и выносом их в нижележащие горизонты и закреплением гуминовых кислот полуторными окислами железа.

Если групповому составу органического вещества посвящена довольно обширная литература, в том числе и по Карелии (Морозова, 1958, 1959; Куликова, Егорова, 1965), то по углеводному составу почв работ очень мало (Вайчис, 1975; Орлов, Садовникова, 1975; Орлов и др., 1979). В Карелии исследование биохимического состава лесных подстилок сосново-березовых насаждений проводила И. П. Лазарева (1979), сосновых и еловых лесов — Л. М. Загуральская, Л. А. Клейн (1994).

Углеводы являются материалом, из которого синтезируются гумусовые кислоты, от их содержания зависит интенсивность биохимических процессов в почве, они являются источником питания микроорганизмов, высших растений, с содержанием полисахаридов связан фосфатный режим почв.

Количественный и качественный состав углеводов лесных подстилок зависит от типа леса и условий трансформации растительного опада. По данным Р. М. Морозовой (Морозова, Федоренко, 1992), содержание растворимых углеводов в этом горизонте составляет 12–16%, минимальное количество их отмечено в подстилках сосняков вересково-лишайниковых (табл. 25). В автоморфных условиях по мере увеличения влажности почвы и улучшения условий минерализации растительного опада увеличивается количество углеводов в подстилках. Дальнейшее повышение влажности почв не приводит к изменению количества растворимых углеводов, однако существенно изменяется их состав. На водорастворимые углеводы (моно- и дисахара) приходится незначительная часть углеводов, содержание их в подстилках закономерно уменьшается от сухих местообитаний к более влажным (от 1,0 до 0,5%).



Таблица 25

Биохимический состав лесных подстилок сосновых лесов, % на абсолютно сухое беззольное вещество

Тип леса	Зольность	Воско-смолы	Моно-и дисахара	Геми-целлюлоза	Целлюлоза	Итого углеводов	Негидролизуемый остаток
Сосняк вересково-лишайниковый	38,9	11,5	1,03	5,32	5,82	12,17	33,05
Сосняк брусничный	16,0	10,5	0,98	4,82	6,58	12,38	41,24
Сосняк черничный свежий	13,3	6,0	0,90	7,68	7,76	16,34	45,55
Сосняк черничный влажный	18,8	6,4	0,78	5,60	7,75	14,13	48,79
Сосняк багульниково-сфагновый	5,1	7,8	0,52	6,99	8,59	16,10	50,41

Моно- и дисахара — это наиболее подвижная и активная часть углеводов, пониженное содержание их в подстилках может быть связано как с миграцией в нижележащие горизонты почвы, так и с потреблением микроорганизмами. Гемичеселлюлоза составляет около 40% от общего количества углеводов. Определенной закономерности содержания гемичеселлюлозы, связанной с типом леса или увлажненностью почв, не выявлено.

Более половины всего количества углеводов находится в форме целлюлозы. Содержание ее в подстилках обратно пропорционально количеству моно- и дисахаридов, т. е. от сосняков лишайниковых к соснякам багульниково-сфагновым количество целлюлозы в лесных подстилках возрастает.

Запас лигнина (негидролизуемого остатка) в подстилках экологического ряда сосняков увеличивается от сосняка вересково-лишайникового к кустарничково-долгомошному — от 33 до 50%. В сухих местообитаниях поступает мало растительного опада, поэтому он разлагается до более простых форм, чем в мезоморфных и гидроморфных условиях. При этом следует помнить, что речь идет об относительном содержании различных форм, абсолютное же их содержание зависит от массы подстилки.

Различные по степени минерализации слои подстилок отличаются по содержанию углеводов. В более минерализованных слоях подстилок уменьшается накопление моно- и дисахаров, что связано с активным потреблением их микроорганизмами и почвенными животными как энергетического материала. В нижних слоях подстилок сосняков черничных находится больше водорастворимых углеводов, что свидетельствует о более интенсивном обмене веществ в данных условиях.

В лесных подстилках почв автоморфного ряда содержание целлюлозы в нижних слоях понижается, т. е. уменьшается количество слабоизмененного растительного материала. Для почв гидроморфного ряда такой закономерности не обнаружено. Количество целлюлозы в различных слоях подстилки слабо зависит от степени ее минерализации.

Содержание лигнина в более гумифицированных слоях выше, т. е. в процессе трансформации растительного материала накапливаются устойчивые к разложению формы органического вещества. Запас различных фракций углеводов в лесных подстилках зависит от общего их веса. Максимальное количество подвижных форм углеводов отмечено в сосняках черничного типа, где создаются оптимальные условия для минерализации и гумификации растительного опада. Особенно показательно в этом отношении содержание моно- и дисахаридов, запас которых в подстилках сосняков черничных в 2–4 раза выше, чем в остальных насаждениях. А большое накопление моно- и дисахаров свидетельствует о биологической активности почв и благоприятном пищевом режиме (табл. 26).

Таблица 26

Запас подстилок и фракций углеводов в сосновых лесах,  $\text{кг} \cdot \text{га}^{-1}$  абсолютно сухого вещества

Тип леса	Общий вес подстилки	Растворимые углеводы				
		Моно- и дисахара	Гемицеллюлоза	Целлюлоза	Итого	Негидролизуемый остаток
Сосняк вересково-лишайниковый	11280	120	600	660	1380	3730
Сосняк брусничный	24070	240	1160	1580	2980	9930
Сосняк черничный свежий	56000	500	4300	4350	9150	25510
Сосняк черничный влажный	65610	510	3680	5090	9280	32010
Сосняк кустарничково-долгомошный	48610	250	3400	4180	7830	24510

Наличие прямой зависимости количества углеводов от типа леса, агрохимических, биохимических и генетических особенностей почв указывает на взаимосвязь физико-химических, биологических процессов и содержания лабильных компонентов почвенного гумуса. Помимо структуры микробного ценоза почвенные условия отражаются на энергии окислительно-восстановительных и гидролитических процессов. Они могут быть охарактеризованы скоростью

ферментативной реакции. Почвенные ферменты являются результатом деятельности многих поколений почвенного населения (Шербакова и др., 1970).

Экзоферменты микроорганизмов продуцируются определенными физиологическими группами. В биологическом круговороте азота участвуют протеолитические энзимы и уреазы. Первые расщепляют белковые вещества до аммиачного азота, вторые дезаминируют мочевину до аммиака. При увеличении ассоциации аммонификаторов возрастает и скорость почвенного протеолиза. Скорость ферментативного расщепления углеводов определяется активностью почвенных энзимов — целлюлазы и инвертазы. Между численностью целлюлозоразлагающих микроорганизмов и целлюлазной активностью существует прямая связь. Активность каталазы дает представление об окислительно-восстановительной способности почвы. В почвах сосняков лишь активность этого фермента в подстилке и минеральных горизонтах в какой-то степени отражает их плодородие. Лесная подстилка является основным источником пищи для микроорганизмов и поэтому ее ферментативная активность выше, чем минеральных горизонтов.

По каталазной активности можно выявить различие в скорости и направлении процессов трансформации органического вещества в различных экологических условиях (табл. 27).

Оценивая азотный режим лесных подстилок в исследуемых типах леса, можно отметить, что наиболее благоприятно для лесных насаждений он складывается в ельниках. Высокая скорость почвенного протеолиза и гидролиза мочевины свидетельствует об активной мобилизации органического азота в почве еловых лесов, а в группе сосновых — в сосняках черничных. Протеолитическая активность является одним из факторов обогащения почвы свободнорастворимыми аминокислотами. Почвы, обладающие высокоактивным протеолитическим комплексом, характеризуются и большим накоплением

Таблица 27  
Ферментативная активность лесных подстилок в среднетаежной подзоне

Тип леса	Протеаза, мг аминного азота · г <sup>-1</sup>	Уреазы, мг аммонийного азота · г <sup>-1</sup>	Каталаза, мл О <sub>2</sub> · 5 мин <sup>-1</sup>
Сосняк черничный, 165 лет	1,1	11,2	24,1
Сосняк брусничный, 165 лет	0,8	4,2	23,2
Ельник разнотравный, 130 лет	2,0	20,8	38,2

Примечание. По данным Л. М. Загуральской, Л. А. Клейн (1994).

свободных аминокислот в лесных подстилках. Их содержание в почве сосняка черничного — 36, сосняка брусничного — 200 мкг · г<sup>-1</sup> ткани за месяц вегетационного периода (Загуральская, Клейн, 1994).

Об интенсивности разложения в почве растительных остатков можно судить по разложению целлюлозы и клетчатки. Ведущим фактором является биохимический и химический состав растительных остатков и гидротермический режим. Интенсивность разложения целлюлозы варьирует в зависимости от возраста насаждения, его состава и уровня поступления органического вещества. В почвах коренных сосновых лесов процессы разложения целлюлозы заторможены, что приводит к накоплению неразложившегося опада и образованию лесных подстилок. В молодых сосновых древостоях отмечается взаимосвязь минерализации целлюлозы и активности окислительно-восстановительных процессов, ферментов азотного обмена и количества аккумулируемых в почве свободных аминокислот и белковых веществ. Интенсивность деструкции целлюлозы зависит от наличия в почве подвижных соединений азота и промежуточных продуктов азотного обмена. Большая изменчивость количества минерального азота в почве в различные по погодным условиям годы связана не только с ходом минерализации органического вещества, но и с интенсивностью процессов иммобилизации (Rashid, Schaffer, 1988), потерь минерализованного азота. Немаловажная роль в обеспечении древесных растений азотной пищей, видимо, принадлежит процессам несимбиотической азотфиксации, за счет которых в лесные экосистемы поступает до 97% азота (Петров-Спиридонов, 1985).

В лесных подстилках биота для своей жизнедеятельности может использовать белковый азот наряду с минеральным, в подзолистых горизонтах питание осуществляется за счет аминных форм.

Несмотря на низкую численность микроорганизмов в минеральных горизонтах, в элювиальном горизонте наблюдается накопление аминокислот, основными потребителями которых являются микроорганизмы, а для растений — это ближайший резерв азотной пищи. Трансформация трудногидролизуемых соединений протекает под влиянием ферментов из группы карбоксидаз, ферментов цикла азота и оксидоредуктаз.

По данным Л. М. Загуральской (1993), возраст соснового древостоя имеет существенное значение для оценки скорости минерализации растительных остатков в лесных подстилках. В перестойных насаждениях увеличивается продолжительность биохимических циклов азота и снижается окислительно-восстановительная способность почв, о чем свидетельствует уменьшение активности дегидрогеназы и каталазы. На уровень активности дегидрогеназы влияет породный

состав древостоя, на скорость почвенного протеолиза и высвобождение амидного азота — его возраст.

Сравнивая ферментативную активность железистых подзолов в среднетаежной и северотаежной подзонах, отмечаем низкую протеолитическую активность подстилок на севере (в 2 раза ниже, чем в средней тайге), а также низкую активность каталазы, что свидетельствует о более замедленных процессах трансформации органического вещества на севере (Загуральская, 1993).

### Биологическая активность торфяных почв

Микробиологические исследования торфяных почв Карелии проводились рядом исследователей (Кашнельсон, Ершов, 1957; Данилевич, Цыба, 1959; Ершов, Кузьмина, 1965; Шубин, Данилевич, 1971; Шубин, 1973). Была показана замедленная активность актиномицетов, спорообразующих, нитрифицирующих и аэробных целлюлозо-разлагающих бактерий.

Микробиологическая деятельность в болотных почвах Карелии выражена слабее, чем в Сибири, ряде областей России и Белоруссии (Вавуло, 1966; Загуральская, 1967; Гантимурова, 1970; Зименко, 1977; Калмыков, Морина, 1978; Смагина, 1988; и др.).

Микробиота торфяных почв на 95–98% состоит из бактерий, грибы составляют 2–5%. Актиномицеты встречаются лишь эпизодически. В силу своей высокой кислотоустойчивости плесневые грибы играют значительную роль в разложении органического вещества торфяных почв. Биохимическая трансформация торфа направлена, в основном, на минерализацию углерод- и азотсодержащих соединений. Ассоциация аммонификаторов разлагает белковый азот до аммиака. В неблагоприятных гидротермических условиях в торфяных почвах преобладают восстановительные процессы, и минерализация белковых веществ заканчивается на стадии образования аммиака. Неблагоприятные физические, химические и температурные условия угнетают деятельность нитрифицирующих бактерий, в результате чего образовавшийся аммиак не подвергается окислению, с чем связано крайне низкое, а иногда и полное отсутствие нитратного азота в торфяных почвах.

В цикле азота лесных почв определенную роль играют азотфиксаторы, в торфяных почвах — это, в основном, несимбиотические азотфиксаторы, симбиотических, связанных с бобовыми растениями, — немного. Из свободноживущих аэробных азотфиксаторов азотобактер не обнаружен, анаэробные типа *Clostridium pasteurianum* тоже имеют довольно ограниченное распространение. В создании азотного фонда



экосистемы некоторую роль играют азотфиксирующие синезеленые водоросли. Из аэробных азотфиксаторов распространены олигонитрофилы и группы олиготрофов. Значение этой группы для почв бореальных лесов очень велико. Благодаря своей многочисленности и отсутствию других активных азотфиксаторов олигонитрофилы обеспечивают почву азотом, препятствуя потере газообразных азотсодержащих соединений (Андреюк, Мальцева, 1978, цит. по: Загуральская, 1993). В торфяных почвах обнаружены аминокислоты: аспарагиновая + серин + глицин, глютаминовая + треонин, аланин, метионин, лейцин. Свободные аминокислоты играют заметную роль в цепи биологического превращения азота в почве. В почву они поступают с корневыми выделениями растений, образуются и в самой почве из растительных и животных белков. В случае недостатка минерального азота в почве они могут служить источником азотного питания растений (Купревич, Щербакова, 1966).

Обеспеченность почв аммиачным азотом тесно связана с уреазной активностью, которая является существенным фактором в обеспеченности насаждений минеральным азотом. По целлюлозоразрушающей способности торфяные почвы превосходят торфяно-глеевые. Торфяные и торфяно-глеевые почвы обладают значительной каталазной и низкой дегидрогеназной активностью.

### 5.3. Групповой и фракционный состав органического вещества почв

Повышенная влажность, низкие температуры, кислая реакция почв, поступление опада, богатого воскомолами, способствуют образованию фульватного гумуса и своеобразному распределению его по профилю. Для исследованных почв характерно основное накопление (до 80%) органического вещества в виде лесной подстилки. С увеличением увлажнения почв и, соответственно, с усилением иллювиально-гумусового процесса содержание органического вещества в почвах возрастает как за счет большей мощности подстилки, так и за счет накопления гумуса в иллювиальном горизонте. В почвах, где влажность минимальна (на повышенных участках), отмечается лишь тенденция элювиально-иллювиального распределения гумуса. Для почв, занимающих подчиненные позиции, характерно более яркое проявление этого процесса.

Связь группового и фракционного состава гумуса с микроморфологией органического вещества исследованных органопрофилей неоднозначна. Достаточно широкое соотношение  $C_{гк} : C_{фк}$  (более 1) в горизонтах, где отмечается большое количество гелеобразного

коллоидного гумуса, по-видимому, связано со значительным содержанием протогумусовых соединений (Орлов, Садовникова, 1975; Гришина, 1986; Орлов, 1990).

Для органического вещества данных почв характерно малое количество гуминовых и фульвокислот, связанных с кальцием, и незначительное содержание или полное отсутствие кислот, прочно связанных с полуторными окислами (табл. 28). Таким образом, ГК и ФК представлены в основном подвижными формами, связанными с полуторными окислами или находящимися в свободном состоянии. Это подтверждается и содержанием подвижных полуторных окислов, распределение которых по профилю почвы совпадает с профильной кривой органического вещества.

Таблица 28

Состав органического вещества в почвах среднетаежной подзоны

Горизонт	Глубина, см	Содержание углерода									Сгк Сфк	Негидролиз. остаток
		Фракции ГК, % от С				Фракции ФК, % от С						
		1	2	3	Сумма	1а	1	2	3	Сумма		
Подзол иллювиально-железистый												
0	0—4	21,9	1,9	2,5	26,3	10,9	9,3	1,2	2,6	24,3	1,1	49,4
Bf1	9—28	8,8	0	1,5	10,3	37,9	22,6	1,0	1,5	63,0	0,2	26,7
Bf2	28—59	8,3	1,0	1,2	10,5	35,4	24,7	0,8	0,7	61,6	0,2	27,9
Торфянистый подзол иллювиально-гумусовый												
L	0—6	25,3	2,1	3,4	30,8	5,3	1,8	0,8	8,1	16,0	1,9	53,2
F	6—12	30,8	1,6	3,9	36,3	7,9	0,9	4,8	9,5	23,1	1,6	40,6
A2	24—40	25,3	0,9	0	26,2	14,8	13,2	3,5	4,5	36,0	0,7	37,8
Bhf	45—57	23,6	0,3	0	23,9	24,7	22,0	0	2,7	49,4	0,5	26,7
Bf	57—64	11,9	0	0	11,9	32,4	18,6	0	1,1	52,1	0,2	36,0
B3	64—85	9,8	0	0	9,8	27,6	22,4	0	0,8	50,8	0,2	39,4

Высвобождающиеся при минерализации растительного опада продукты имеют кислую природу (вследствие низкой зольности опада хвойных лесов). Они создают кислую реакцию, которая неблагоприятна для процессов конденсации продуктов полураспада (Гришина, 1986).

### Выводы

В составе почвенной фауны Восточной Фенноскандии преобладают в основном мелкие организмы, такие как микроартроподы и энхитреиды, а из мезофауны — личинки двукрылых и в незначительной

степени дождевые черви и диплоподы. По численности первое место занимают нематоды, на втором — панцирные клещи. В связи с невысокой влажностью и повышенной кислотностью в почвах сосняков отмечаются небольшие численность и биомасса почвенных животных по сравнению с почвами ельников.

Основными деструкторами лесных подстилок в хвойных лесах являются микроскопические грибы. Роль грибов в деструкции подстилок выше в спелых насаждениях, в молодых лесах возрастает участие бактерий. Микробный пул лесных подстилок сосняков значительно беднее по сравнению с почвами еловых лесов. В северотаежной подзоне в связи с климатическими особенностями, а также физическими и химическими свойствами почвы формируются чрезвычайно малочисленные микробоценозы. В связи с поверхностной деструкцией поступающего опада формируются грубогумусные лесные подстилки и слабо разложившиеся торфа с низким уровнем минерализации и преобладанием синтеза органических веществ над их распадом.

Опад хвойных насаждений содержит много веществ типа воско-смола, тормозящих разложение растительных остатков. Для органо-генного горизонта почв региона характерно их высокое содержание. В процессе гумификации и минерализации растительного опада происходит накопление веществ типа битумов, которых содержится в подстилках тем больше, чем хуже условия для минерализации. Легкоусвояемых микроорганизмами и высшими растениями веществ типа моно- и дисахаров в этих почвах находится незначительное количество.

Для органического вещества лесных подстилок региона характерно высокое содержание фульвокислот и негидролизимого остатка. Отмечается малое количество гумусовых кислот, связанных с кальцием, и незначительное содержание или полное отсутствие кислот, прочно связанных с полуторными окислами.

## Глава 6

# АЗОТНЫЕ СОЕДИНЕНИЯ В ЛЕСНЫХ ПОЧВАХ (СТАТИКА И ДИНАМИКА)

### 6.1. Состав азотного фонда лесных почв

При определении количества питательных веществ в почве с помощью химических методов наиболее сложным является установление уровня обеспеченности растений доступным азотом. Необходимый этап в изучении азотного режима питания растений — определение фракционного состава азотных соединений в почве.

В составе азотного фонда почв обычно выделяют три группы соединений:

- 1) подвижные соединения азота: а) минеральный азот ( $\text{NH}_4$ ,  $\text{NO}_3$ ,  $\text{NO}_2$ ); б) легкогидролизуемый азот (амиды, часть аминов);
- 2) трудногидролизуемый азот (амины, часть амидов, часть обменного аммония и часть азота гуминовых кислот);
- 3) негидролизуемый азот (гумины, меланины, битумы, обменный, или фиксированный, аммоний) (Шконде, Королева, 1965).

Все эти соединения имеют неодинаковую ценность для растений и различную подвижность в почвенном профиле. Минеральный азот является непосредственным источником питания растений, легкогидролизуемый характеризует их ближайший резерв. Данные о природе органического азота основаны, главным образом, на химических исследованиях с применением обработки горячими растворами кислот. При определении легкогидролизуемого азота чаще всего используют метод Тюрина — Кононовой (1934). Содержание азота, выявленное этим способом, является характерным показателем для разных типов почв с различной устойчивостью гумусовых веществ. Однако этот метод может давать противоречивые результаты. Часто высокое содержание азота определяют в кислых почвах, тогда как обеспеченность азотом на этих почвах низкая (Уинзор, 1959, цит. по: Никифоренко, 1974). Показатели количества легкогидролизуемого азота по Тюрину — Кононовой не всегда отражают запасы легкоомобильных веществ, потому что гидролизом (0,5 н.  $\text{H}_2\text{SO}_4$ ) извлекаются и достаточно устойчивые к минерализации вещества, например, фульвокислоты (Рыдалевская, Терешенкова, 1965).

В состав фракции щелочногидролизуемого азота (Cornfield, 1960) входит обменный аммоний, а также органические азотсодержащие соединения (аминосакхара, амиды и частично моноаминокислоты). При щелочном гидролизе (1 н. NaOH) происходит более полное расщепление органических соединений, в результате извлекается в несколько раз больше азота по сравнению с методом Тюрина — Кононовой.

По данным Э. И. Шконде (1971), Е. П. Юрко (1972) и др., количество азота, определяемое методом Корнфилда, имеет тесную корреляцию с содержанием в почве гумуса, общего азота и, главное, с урожаями культур. При изучении азотного фонда лесных почв мы разделили его на три группы азотных соединений:

- 1) минеральный азот ( $N-NH_4 + N-NO_3$ );
- 2) гидролизуемый по Корнфилду;
- 3) негидролизуемый, который находили по разности между валовым и щелочногидролизуемым.

## АЗОТНЫЕ СОЕДИНЕНИЯ В ПОЧВАХ СРЕДНЕТАЕЖНОЙ ПОДЗОНЫ

Содержание азота в почвах сосняков экологического ряда по увлажнению, сформировавшихся на однородных флювиогляциальных песках

*Общее содержание азота* в почвах тесно связано с органическим веществом. Наибольшее количество азота определено в лесных подстилках и органогенных горизонтах болотных почв (табл. 29): в профиле торфяных почв — 0,78–1,1; в подстилках сосняков брусничных — 0,71–0,81 и сосняков черничных — 1,24–1,36%.

В минеральных горизонтах подзолов его значительно меньше — до 0,1%. Профильное распределение азота тесно связано с распределением гумуса. В почвах автоморфного ряда его содержание постепенно уменьшается с глубиной.

Как уже было сказано в главе 4, запасы валового азота в почвах возрастают по мере увеличения степени их увлажненности. Эта же закономерность прослеживается и в экологическом ряду сосняков на однородных песках. Наибольшее количество общего азота в 50-сантиметровом слое определено в торфяных почвах ( $7,9 \text{ т} \cdot \text{га}^{-1}$ ), затем в торфянистых подзолах ( $3,6 \text{ т} \cdot \text{га}^{-1}$ ). В автоморфном ряду подзолов запасы валового азота в 50-сантиметровом слое почв наибольшие в черничных типах леса влажном и свежем (2,6–2,2), ниже в брусничном (1,7) и вересковом ( $1,3 \text{ т} \cdot \text{га}^{-1}$ ). Основное количество азота



Таблица 29

Содержание общего азота в почвах сосновых лесов на флювиогляциальных песках, %

Горизонт	Глубина, см	Азот	Горизонт	Глубина, см	Азот
Сосняк вересково-лишайниковый, поверхностно-подзолистая песчаная почва			Сосняк брусничный, подзол иллювиально-железистый песчаный		
0	0–3	0,660	L	0–1	0,713
A2	3–7	0,043	F	1–3	0,813
Bf	7–15	0,035	A2	3–8	0,050
B2	15–35	0,02	Bf	8–30	0,026
BC	35–55	0,021	B2	30–55	0,024
C	55–80	0,010	BC	55–100	0,010
			C	100–110	0,011
Сосняк черничный свежий, подзол иллювиально-гумусово-железистый песчаный			Сосняк черничный влажный, подзол иллювиально-железисто-гумусовый песчаный		
L	0–2	1,238	L	0–3	1,270
F	2–4	1,358	F	3–5	1,220
A2	4–10	0,075	H	5–9	1,200
Bhf	10–20	0,050	A2	9–23	0,030
B2	20–40	0,022	Bfh	23–50	0,120
B3	40–60	0,017	B2	50–60	0,030
BC	60–100	0,014	BC	60–70	0,100
C	100–120	0,014	C	70–100	Не опр.
Сосняк кустарничково-долгомошный, торфянистый подзол иллювиально-гумусовый песчаный			Сосняк багульниково-сфагновый, торфяная переходная почва		
0	0–13	1,210	OT1	0–4	1,051
T1	13–27	0,980	OT2	4–8	0,987
A2	27–43	1,100	T1	8–26	1,609
A2B	43–47	0,030	T2	26–53	1,784
Bh	47–53	0,070	Dg	53–глубже	0,077
Bfh	53–60	0,050			
BCg	60–90	Не опр.			

сосредоточено в минеральных горизонтах. В лесных подстилках валовые запасы азота ниже ( $0,65\text{--}0,30 \text{ т} \cdot \text{га}^{-1}$ ), но по мере увеличения уровня увлажнения они возрастают.

Как уже говорилось, важным показателем почвенного плодородия является отношение  $C : N$ , характеризующее степень минерализации органического вещества и содержание в нем азота. Исследуемые почвы характеризуются очень широким отношением углерода к азоту вследствие небольшого количества азота в почвах. Отношение  $C : N$  в лесных подстилках составляет 32–35, в минеральных горизонтах – 8–26. Низкое содержание азота в лесных подстилках тормозит разложение растительных остатков. С глубиной увеличивается степень минерализованности органического вещества и обогащение его азотом.

Исследования (Шумаков, Федорова, 1970) показывают, что сосна испытывает острый недостаток азота, если содержание его в лесной подстилке меньше 1,7%, а отношение  $C : N$  больше 33. В изучаемых почвах содержание азота в подстилках автоморфных почв составляет 0,66–1,27%, а отношение  $C : N$  – 36–45, что свидетельствует о слабой трансформации органического вещества при низком содержании азота.

Таким образом, установлено, что исследуемые почвы характеризуются низким содержанием азота и широким отношением  $C : N$  в подстилках. Следовательно, формирующиеся на них сосновые насаждения слабо обеспечены азотом и, очевидно, нуждаются в удобрении.

*Содержание аммонийного азота* в почвах взаимосвязано с типом леса. Наибольшее количество обменного аммония обнаружено в торфяных горизонтах почв сосняков багульниково-сфагновых и кустарничково-долгомошных (38–43 мг на 100 г), в автоморфном ряду – в подстилках сосняков черничных (25–29 мг на 100 г) (табл. 30). Несмотря на высокое содержание аммиачного азота в подзолисто-болотных и торфяных почвах, сосняки, произрастающие на этих почвах, менее продуктивны, чем черничные, так как высокая влажность (до 100% и более) и периодическое состояние анаэробнобиоза препятствуют нормальному поглощению питательных веществ. Максимум аммонийного азота в подзолистых почвах приурочен к подстилкам, в минеральных горизонтах его значительно меньше. Такая закономерность объясняется, в первую очередь, распределением по профилю общего азота, а также активной деятельностью аммонификаторов в лесной подстилке и почти полным отсутствием их в минеральных горизонтах (Арефьева, Колесников, 1964).

Запасы аммиачного азота в 50-сантиметровом слое оказались наибольшими в торфяных почвах сосняков багульниково-сфагновых (148 кг · га<sup>-1</sup>), а затем – в подзолах сосняков черничных (64,4) и наименьшими – в поверхностно-подзолистых почвах сосняков лишайниковых (40,4).

*Нитратный азот* в почвах исследуемых насаждений обнаружен в небольших количествах и приурочен, в основном, к органогенным горизонтам (1,4–1,8 мг на 100 г), в минеральных горизонтах нитратов крайне мало (следы) (табл. 31). Содержание в почве нитратного азота изменяется в течение вегетационного периода. Одним из факторов, подавляющих процессы нитрификации в исследуемых почвах, являются высокая кислотность всех почв и избыточное увлажнение в сосняках багульниково-сфагновых. Можно предположить, что то небольшое количество нитратов, которое все же образуется в почве, интенсивно используется растениями и микроорганизмами.

Таблица 30

Содержание аммонийного азота в почвах сосновых лесов  
на флювиогляциальных песках, мг на 100 г а. с. почвы

Горизонт	Глубина, см	N-NH <sub>4</sub>	Горизонт	Глубина, см	N-NH <sub>4</sub>
Сосняк вересково-лишайниковый, поверхностно-подзолистая песчаная почва			Сосняк брусничный, подзол иллювиально-гумусово-железистый песчаный		
L	0–1	7,4	L	0–1	16,3
F	1–3	13,0	F	1–3	16,0
A2	3–7	3,6	A2	3–8	0,8
Bf	7–15	1,4	Bf	8–30	0,9
B2	15–35	1,0	B2	30–55	1,1
BC	35–55	0,9	BC	55–100	0,7
C	55–80	0,6	C	100–110	0,6
Сосняк черничный свежий, подзол иллювиально-гумусово-железистый песчаный			Сосняк черничный влажный, подзол иллювиально-железисто-гумусовый песчаный		
L	0–2	23,3	L	0–3	29,0
F	2–4	21,9	F	3–5	25,0
A2	4–10	1,7	H	5–9	3,8
Bhf	10–20	1,3	A2	9–23	1,7
B2	20–40	1,1	Bfh	23–50	1,2
B3	40–60	1,1	Bf	50–60	1,0
BC	60–100	0,9	B2	60–70	1,0
C	100–120	0,8	C	70–100	0,9
Сосняк кустарничково-долгомошный, торфянистый подзол иллювиально-гумусовый песчаный			Сосняк багульниково-сфагновый, торфяная переходная почва		
O	0–13	38,0	OT1	0–4	35,1
T1	13–27	43,0	OT2	4–8	3,5
A2	27–43	1,8	T1	8–26	26,4
A2B	43–47	1,4	T2	26–53	12,8
Bh	47–53	1,3	Dg	53–глубже	1,2
Bfh	53–60	0,9			
BCg	60–90	0,5			

Анализ лизиметрических растворов песчаных подзолов Карелии (Морозова и др., 1971; Шахова, Шилова, 1974) показал либо полное отсутствие нитратов, либо низкое их содержание в лизиметрических водах.

Изучение нитрификационной способности почв, проведенное в лабораторных опытах, позволило выявить слабую интенсивность данного процесса даже при оптимальных условиях температуры и влажности.

*Содержание щелочногидролизуемого азота по Корнфилду* в почвах сосняков, как и других азотных соединений, тесно связано с наличием в почве органического вещества и общего азота. Максимум

Таблица 31

Содержание нитратного азота  
в почвах сосновых лесов  
на флювиогляциальных песках,  
мг на 100 г а. с. почвы

Горизонт	Глубина, см	N-NO <sub>3</sub>
Сосняк брусничный, подзол иллювиально-железистый песчаный		
L	0—1	1,20
F	1—3	1,10
A2	3—8	0,12
Bf	8—30	0,05
B2	30—55	0,06
BC	55—100	0,04
C	100—110	0,04
Сосняк багульниково-сфагновый, торфяная переходная		
OT1	0—4	1,37
OT2	4—8	1,39
T1	8—26	1,02
T2	26—53	0,59
Dg	53—глубже	0,13
Сосняк черничный свежий, подзол иллювиально-гумусово-железистый песчаный		
L	0—2	1,78
F	2—4	1,55
A2	4—10	0,14
Bhf	10—20	0,08
Bf	20—40	0,05
B3	40—60	0,05
BC	60—100	0,05
C	100—120	0,06

содержания щелочногидролизуемого азота отмечен в органических горизонтах торфяных почв сосняков багульниково-сфагновых (55,8—104 мг на 100 г), затем в лесных подстилках сосняков черничных (73,8—85,9), минимум — в лишайниковых (52,8 мг на 100 г) (табл. 32).

Запасы гидролизуемого азота в корнеобитаемом слое (50 см) наибольшие в торфяных почвах (623, 9 кг · га<sup>-1</sup>), затем в подзолах сосняков черничных (202,4) и наименьшие — в подзолистых почвах сосняков вересково-лишайниковых (127,4 кг · га<sup>-1</sup>).

Относительное содержание аммиачного азота в составе фракции, переходящей в щелочную вытяжку, в подзолах составляет 31,3—31,8%, в торфяных почвах — 23,7%, т. е. в составе щелочногидролизуемого азота преобладают органические азотсодержащие соединения.

*Запасы различных азотных соединений* в почвах зависят от их содержания, мощности и плотности генетических го-

ризонтов и, на наш взгляд, являются информативными показателями обеспеченности растений азотом, позволяют оценить состав азотного фонда и воздействие на него различных факторов, в том числе и антропогенных.

Определение валовых запасов азота в почвах показало, что наиболее богаты им подстилки сосняков черничных свежих (рис. 13). В 50-сантиметровом слое запасы его возрастают по мере увеличения степени увлажнения почв (рис. 14). Аналогичная закономерность прослеживается и при накоплении подвижных азотных соединений — минерального и щелочногидролизуемого.

Таблица 32

Содержание щелочногидролизуемого азота в почвах сосновых лесов на флювиогляциальных песках, мг на 100 г а. с. почвы

Горизонт	Глубина, см	Азот	Горизонт	Глубина, см	Азот
Сосняк вересково-лишайниковый, поверхностно-подзолистая песчаная почва			Сосняк брусничный, подзол иллювиально-железистый песчаный		
0	0–3	52,8	L	0–1	63,5
A2	3–7	5,2	F	1–3	61,5
Bf	7–15	1,0	A2	3–8	5,9
B2	15–35	1,7	Bf	8–30	3,6
BC	35–55	2,0	B2	30–55	2,1
C	55–80	1,3	BC	55–100	1,4
			C	100–110	1,4
Сосняк черничный свежий, подзол иллювиально-гумусово-железистый песчаный			Сосняк багульниково-сфагновый, торфяная переходная почва		
L	0–2	85,9	OT1	0–4	104,0
F	2–4	73,8	OT2	4–8	70,9
A2	4–10	7,0	T1	8–26	97,2
Bhf	10–20	6,4	T2	26–53	62,8
Bf	20–40	2,4	Dg	53–глубже	5,3
B2	40–60	2,2			
BC	60–100	1,5			
C	100–120	2,0			

В автоморфном ряду почвы сосняка черничного свежего наиболее обеспечены усвояемыми для растений соединениями азота. Несмотря на высокое накопление азота в торфяной переходной почве, сосняки, произрастающие здесь, имеют низкий бонитет в связи с неблагоприятными гидрологическими условиями.

Все исследуемые почвы характеризуются низким накоплением минерального азота. Так, запасы аммиачного азота в корнеобитаемом слое подзолов составляют не более 3,3%, а в торфяных еще ниже – 1,9% от валовых запасов. Нитратного азота всего лишь 0,2–0,3%. Доля гидролизуемого азота, определенного методом Корнфилда, выше, чем минерального: в подзолах 9,2–10,4%, а в торфяных – 7,9%. Большая часть азотного фонда почв – это негидролизуемый азот: 89,3–90,6% – в подзолах, 91,8% – в торфяных почвах.

Двумерный регрессионный анализ наличия общего, аммиачного, нитратного и гидролизуемого азота показал тесную прямую корреляционную связь между валовыми запасами азота и его подвижными



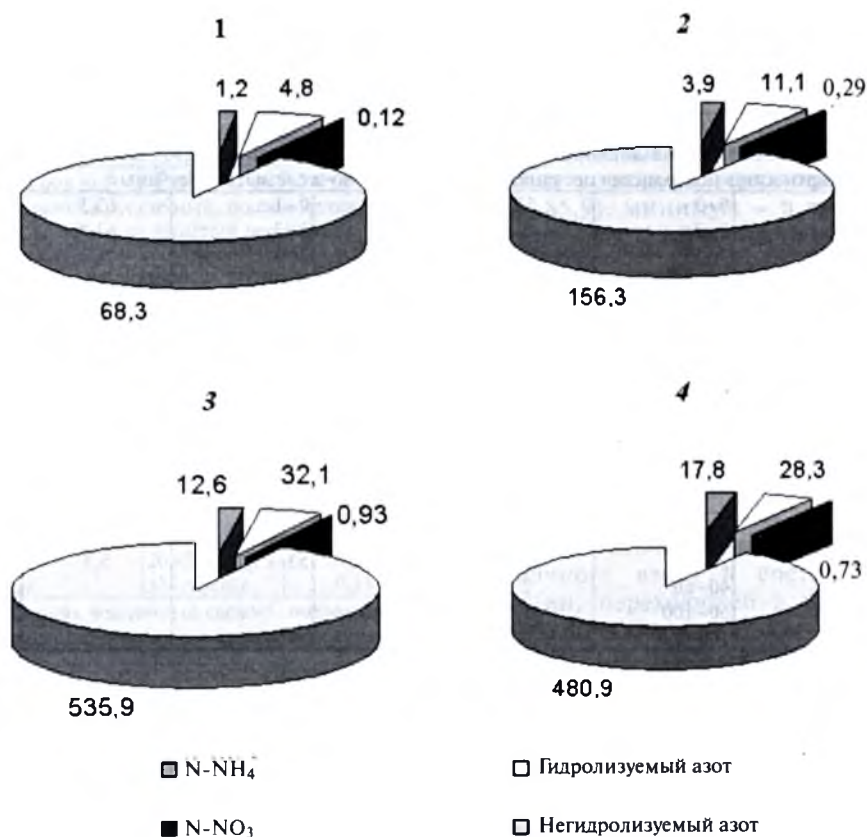


Рис. 13. Фракционный состав азотных соединений в подстилках сосняков экологического ряда, кг/га:

1 – поверхностно-подзолистая песчаная, сосняк вересково-лишайниковый; 2 – подзол иллювиально-железистый песчаный, сосняк брусничный; 3 – подзол иллювиально-гумусово-железистый песчаный, сосняк черничный свежий; 4 – торфяная переходная, сосняк багульниково-сфагновый

формами в подзолах сосняков брусничных и черничных: коэффициент корреляции выше 0,9. Для этих же почв установлена прямая корреляционная зависимость между запасами щелочногидролизуемого и аммонийного азота (табл. 33).

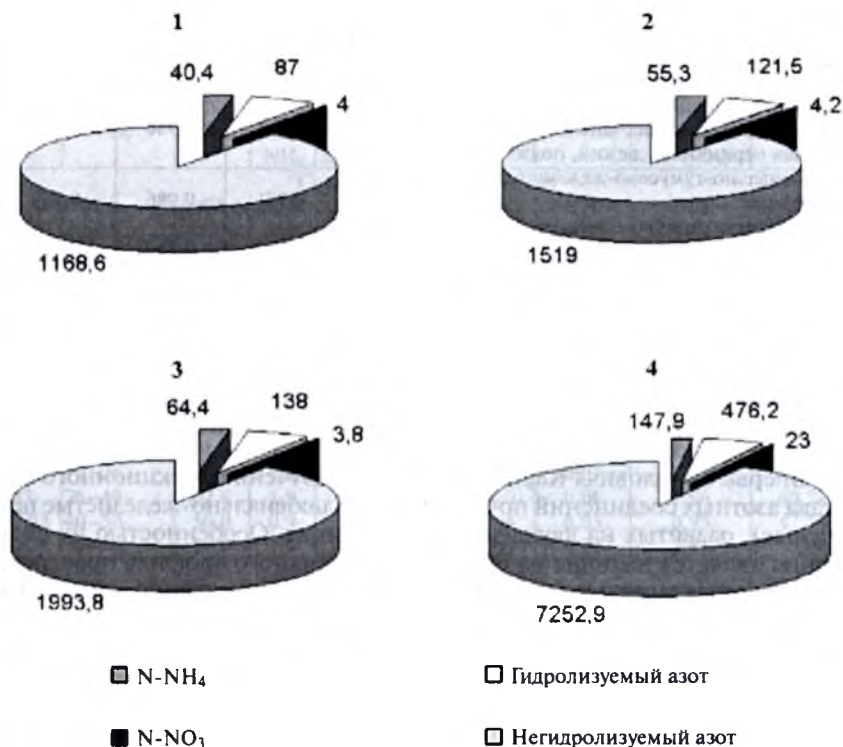


Рис. 14. Фракционный состав азотных соединений в 50-сантиметровом слое почв экологического ряда сосновых лесов, кг/га:

1 – поверхностно-подзолистая песчаная, сосняк вересково-лишайниковый; 2 – подзол иллювиально-железистый песчаный, сосняк брусничный; 3 – подзол иллювиально-гумусово-железистый песчаный, сосняк черничный свежий; 4 – торфяная переходная, сосняк багульниково-сфагновый

В торфяных почвах сосняков багульниково-сфагновых зависимость подвижных соединений азота от количества общего менее тесная ( $K = 0,488$ ), что связано с избыточным увлажнением почв, где аммонийный азот не используется в полной мере растительностью, а накапливается в почве.

Таблица 33

Коэффициенты корреляции между содержанием общего азота и его подвижными формами в почвах

Тип леса, почва	$K_1$	$K_2$	$K_3$	$K_4$
Сосняк брусничный, подзол иллювиально-железистый песчаный	0,988	0,955	0,988	0,996
Сосняк черничный свежий, подзол иллювиально-гумусово-железистый песчаный	0,957	0,951	0,986	0,989
Сосняк багульниково-сфагновый, торфяная переходная	0,488	0,774	0,760	0,905

*Примечание.*  $K_1$  — коэффициент корреляции между содержанием общего и аммонийного,  $K_2$  — общего и нитратного,  $K_3$  — общего и щелочногидролизуемого,  $K_4$  — щелочногидролизуемого и аммонийного азота.

### Содержание азота в почвах сосняков черничных, сформировавшихся на двучленных отложениях

Впервые в условиях Карелии проведено изучение фракционного состава азотных соединений почв (подзолы иллювиально-железистые песчаные), развитых на двучленных отложениях. Особенностью их сложения является наличие на общем фоне песчаного профиля прослоек, обогащенных илистыми частицами, которые существенно влияют на водный и пищевой режим почв. В результате увеличивается водоудерживающая способность почв, создаются большие запасы продуктивной влаги, в два раза превышающие таковые на однородных песках.

Как показали исследования, накопление общего азота в подзолах с анизотропным строением профиля выше, чем в иллювиально-железистых подзолах, сформировавшихся на однородных песках. Характер распределения общего азота по профилю аналогичен в обоих случаях (табл. 34). Следует отметить более узкое отношение  $C : N$  в подстилках сосняков на двучленных наносах, равное 26, тогда как этот же показатель для подстилок почв на однородных песках составляет 36.

По содержанию минерального и гидролизуемого азота подзолы иллювиально-железистые на двучленных отложениях занимают промежуточное положение между подзолами иллювиально-железистыми и подзолами иллювиально-гумусово-железистыми на однородных песках (рис. 15).

Валовые запасы азота в 50-сантиметровом слое железистых подзолов на двучлене (рис. 16) в 2 раза выше, чем в таком же слое (включая подстилку) подзолов иллювиально-гумусово-железистых на однородных песках. Запасы минерального и гидролизуемого азота близки.

Таблица 34

Содержание азота в подзолах иллювиально-железистых песчаных  
на двучленных отложениях, мг на 100 г а. с. почвы

Гори зонт	Глубина, см	N общ.	Азот щелочногидролизую- мый			N-NO <sub>3</sub>	Мине- ральный (N-NH <sub>4</sub> + N-NO <sub>3</sub> )	Негидро- лизую- мый
			N- NH <sub>4</sub>	лабильный, органический	сумма			
Сосняк черничный 165 лет								
L	0—1,5	1400,0	20,7	44,8	65,5	0,50	21,20	1334,0
F	1,5—5(6)	895,0	4,3	13,6	17,9	0,12	4,42	877,8
A2	5(6)—10	68,1	1,2	1,4	2,6	0,10	1,30	65,4
Bf	10—24(35)	90,0	1,2	1,8	3,0	0,06	1,26	86,94
B2	24(35)—43	72,8	0,9	1,4	2,3	0,08	0,98	70,5
IIВ3	43—58	83,0	0,44	1,4	1,8	0,05	0,49	80,71
BC	58—глубже	58,0	0,45	4,3	4,7	0,03	0,48	53,27
Сосняк черничный 50 лет								
L	0—1(2)	1462,9	18,7	56,5	76,2	0,74	19,44	1385,96
F	1(2)—4(5)	963,6	4,3	15,7	20,0	0,10	4,40	913,5
A2	5—10	71,7	1,2	1,1	2,3	0,11	1,31	69,29
Bf	10—26	73,0	1,1	2,9	4,0	0,07	1,17	68,93
B2	26—40	62,8	1,9	0,1	2,0	0,06	1,96	60,74
IIВ3	40—50	50,0	0,9	1,5	2,4	0,03	0,93	47,57
BC1	50—70	10,0	1,4	1,2	2,6	0,01	1,41	7,39

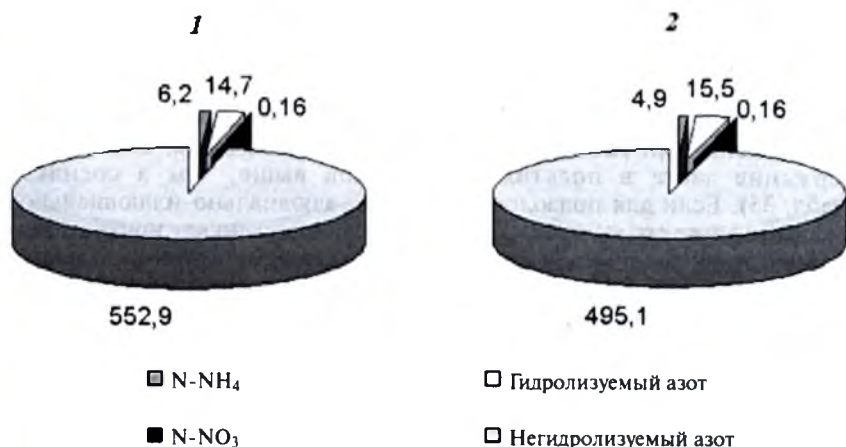


Рис. 15. Фракционный состав азотных соединений в подстилках подзолов иллювиально-железистых песчаных на двучленных отложениях:

1 – сосняк черничный 165 лет; 2 – сосняк черничный 50 лет

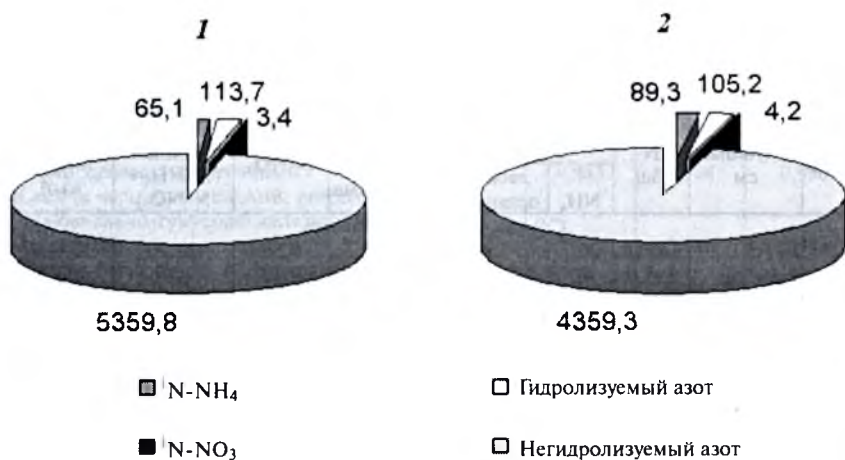


Рис. 16. Запасы азота в 50-сантиметровом слое подзолов иллювиально-железистых песчаных на двучленных отложениях:

1 – сосняк черничный 165 лет; 2 – сосняк черничный 50 лет

### Содержание азота в почвах ельников

Фракционный состав азотных соединений изучали в среднетаежной подзоне в элювиально-поверхностно-глееватых глинистых почвах, сформировавшихся на ленточных глинах под высокопродуктивными ельниками разнотравными 130-летнего возраста. Валовое содержание азота в подстилках ельников выше, чем в сосняках (табл. 35). Если для подзолов характерно элювиально-иллювиальное распределение его по профилю, то в элювиально-поверхностно-глееватых почвах соединения азота распределяются монотонно, с постепенным уменьшением их количества с глубиной. Помимо органогенного горизонта, богат азотом горизонт A1A2 (180 мг на 100 г). Подстилки ельника несколько богаче минеральным и щелочногидролизуемым азотом, чем песчаных подзолов под сосновыми лесами. Однако в минеральных горизонтах песчаных почв в связи с более благоприятными гидротермическими условиями больше образуется как аммонийного, так и нитратного азота. Процесс накопления щелочногидролизуемого азота в минеральных горизонтах глинистых элювиально-поверхностно-глееватых почв складывается в пользу органических соединений азота, в то время как в подзолах показатели содержания органического и аммонийного азот примерно одинаковы.



Таблица 35

Содержание азотных соединений в элювиально-поверхностно-глееватых глинистых почвах на ленточных глинах в ельнике разнотравном 130 лет, мг на 100 г а. с. почвы

Горизонт	Глубина, см	Общий азот	N-NH <sub>4</sub>	N-щелочно-гидролизуемый	N-NO <sub>3</sub>
L	0–3	1520	27,0	72,2	0,40
F	3–4	1210	20,3	64,0	0,36
A1A2	4–6(7)	180	1,8	4,3	0,09
ABh	6(7)–15	70	0,8	1,8	Нет
IIA2g	15–35	140	0,35	3,1	Нет
IIBtg	35–75	40	0,02	1,5	Нет

Мощность подстилки в ельнике меньше, чем в сосняке, но она богаче азотом, поэтому и его запасы оказались близкими (рис. 17). Что касается запасов азота в 50-сантиметровом слое почв (включая подстилку), то в ельнике они в 1,5 раза выше. Интересно отметить тот факт, что в подстилках ельников запасы минерального азота (N-NH<sub>4</sub> + N-NO<sub>3</sub>) в 1,5 раза выше, чем в песчаных подзолах высокопродуктивных сосняков, но в 50-сантиметровом слое почвы – в 3 раза ниже.

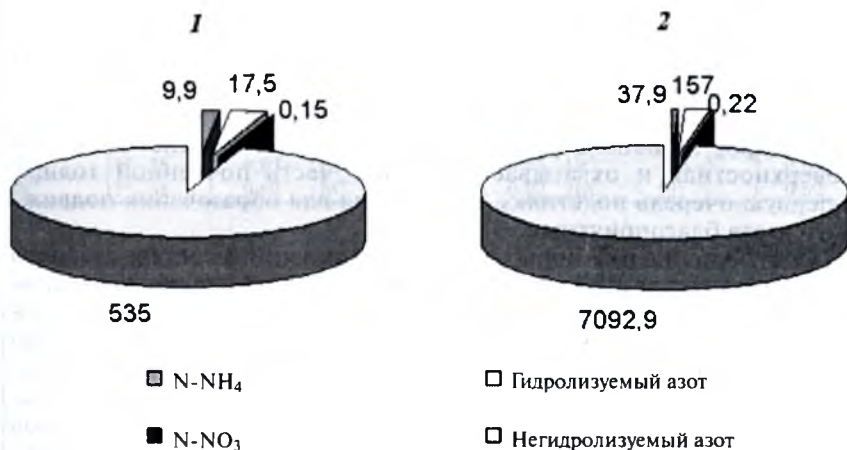


Рис. 17. Фракционный состав азотных соединений в элювиально-поверхностно-глееватых глинистых почвах. Ельник разнотравный 130 лет:

1 – подстилка; 2 – 50-сантиметровый слой (включая подстилку)

Запасы щелочногидролизуемого азота в подстилках и в 50-сантиметровом слое обеих почв близки между собой. В составе фракции щелочногидролизуемого азота подстилок соотношение минерального и лабильного органического азота составляет в элювиально-поверхностно-глееватых почвах 1 : 1,5–2,0, в 50-сантиметровом слое – 1 : 5, а в подзолах соответственно 1 : 2 и 1 : 1,5.

Продуцирование минерального азота в подстилках и минеральных горизонтах подзолов идет достаточно интенсивно благодаря благоприятным гидротермическим и водно-воздушным условиям, в то время как в минеральных горизонтах элювиально-поверхностно-глееватых глинистых почв условия минерализации органических азотсодержащих соединений в подстилках и нижележащих горизонтах складываются иначе. Периодический застой влаги, неблагоприятные условия аэрации, меньшее прогревание глинистых почв препятствуют активному образованию минерального азота, и не только нитратного, но и аммонийного. В то же время процессы продуцирования лабильных органических соединений азота идут интенсивно. Следует отметить, что количество минерального и гидролизуемого азота, которое измеряется в почве при помощи существующих аналитических методов, является результирующей величиной, определяемой, с одной стороны, гидротермическими условиями в почве, а с другой – интенсивностью поглощения соединений азота корневой системой растений. Условия периодического переувлажнения глинистых почв ельников не влияют отрицательно на поглощение азота из почвы, как это происходит в торфяных почвах, содержащих значительное количество подвижного азота, которое не используется растениями. Корневая система ели – поверхностная и охватывает верхнюю часть почвенной толщи, в первую очередь подстилку, где условия для образования подвижного азота благоприятные.

Соотношение различных азотных соединений в составе азотного фонда подстилки и 50-сантиметрового слоя элювиально-поверхностно-глееватых почв ельника различно. В подстилках минеральный азот составляет 1,8% от общего, что близко к этому же показателю для подзолов сосновых лесов (1,0–1,1%). Относительное содержание азота по Корнфилду также близко в подстилках сосняков и ельников (3,6–4,0 и 4,9%). Но в 50-сантиметровом слое почв ельников минеральный азот составляет всего лишь 0,5%, тогда как для сосняков обычные показатели 1,2–2,1%. Основную часть азотного фонда элювиально-поверхностно-глееватых глинистых почв составляет негидролизуемый азот – 95,1–97,3%, так же как и в сосняках (95,7–96,4%).

## АЗОТНЫЕ СОЕДИНЕНИЯ В ПОДЗОЛАХ СЕВЕРОТАЕЖНОЙ ПОДЗОНЫ

В Карелии впервые проведено исследование фракционного состава азотных соединений в подзолах иллювиально-железистых и иллювиально-гумусово-железистых, сформировавшихся на песчаных озерно-ледниковых отложениях и песчаной сильно завалуненной морене под сосняками брусничными и черничными 6 класса возраста. Валовое содержание азота в почвах низкое, в подстилках колеблется от 0,81 до 0,94%, в минеральных горизонтах — от 0,02 до 0,09%, убывая с глубиной. По содержанию общего азота и подвижных азотных соединений (аммонийный и щелочногидролизуемый азот) богаче подзол иллювиально-гумусово-железистый, где содержание лабильного азота в подстилках соответственно 15,8 и 56,4 мг на 100 г почвы (табл. 36–38). В подзолах иллювиально-железистых эти показатели

Таблица 36

Валовое содержание азота в подзолах сосняков, %

Сосняк брусничный, подзол иллювиально-железистый песчаный на озерно-ледниковых отложениях			Сосняк черничный, подзол иллювиально-железистый песчаный на морене			Сосняк брусничный, подзол иллювиально-гумусово-железистый песчаный на морене		
Горизонт	Глубина, см	Азот	Горизонт	Глубина, см	Азот	Горизонт	Глубина, см	Азот
0	0–3	0,81	0	0–5	0,94	0	0–5	0,93
A2	3–8	0,05	A2	5–15	0,09	A2	5–13	0,07
Bf	8–17	0,03	Bf	15–26	0,05	Bhf	13–19	0,04
B2	17–35	0,03	B2	26–46	0,03	B2	19–37	0,03
BC	35–58	0,02	BC	46–87	0,02	BC	37–77	0,02

Таблица 37

Содержание аммонийного азота в подзолах сосняков, мг на 100 г а. с. почвы

Сосняк брусничный, подзол иллювиально-железистый песчаный на озерно-ледниковых отложениях			Сосняк черничный, подзол иллювиально-железистый песчаный на морене			Сосняк брусничный, подзол иллювиально-гумусово-железистый песчаный на морене		
Горизонт	Глубина, см	N-NH <sub>4</sub>	Горизонт	Глубина, см	N-NH <sub>4</sub>	Горизонт	Глубина, см	N-NH <sub>4</sub>
0	0–3	13,6	0	0–5	13,1	0	0–5	15,8
A2	3–8	1,1	A2	5–15	1,1	A2	5–13	1,7
Bf	8–17	0,9	Bf	15–26	1,0	Bhf	13–19	1,4
B2	17–35	1,0	B2	26–46	0,7	B2	19–37	1,1
BC	35–58	0,7	BC	46–87	0,5	BC	37–77	0,9

Таблица 38

Содержание щелочногидролизуемого азота в подзолах сосняков,  
мг на 100 г а. с. почвы

Сосняк брусничный, подзол иллювиально-железистый песчаный на озерно-ледниковых отложениях			Сосняк черничный, подзол иллювиально-железистый песчаный на морене			Сосняк брусничный, подзол иллювиально-гумусово-железистый песчаный на морене		
Горизонт	Глубина, см	N по Корнфилду	Горизонт	Глубина, см	N по Корнфилду	Горизонт	Глубина, см	N по Корнфилду
0	0–3	50,5	0	0–5	41,7	0	0–5	56,4
A2	3–8	4,7	A2	5–15	2,2	A2	5–13	4,1
Bf	8–17	3,3	Bf	15–26	2,9	Bhf	13–19	3,3
B2	17–35	2,1	B2	26–46	2,2	B2	19–37	2,2
BC	35–58	1,8	BC	46–87	1,8	BC	37–77	1,9

ниже и составляют в подстилках: для аммонийного азота – 13,1–13,6; для щелочногидролизуемого – 41,7–50,5 мг на 100 г. В минеральных горизонтах содержание аммония в 10–15 раз меньше, чем в подстилках, а количество щелочногидролизуемого азота – в 15–20 раз. Сравнивая содержание общего азота в подзолах иллювиально-железистых северной и средней таежной подзон, отмечаем, что они близки. Валовое содержание азота в подзолах иллювиально-гумусово-железистых выше в среднетаежной подзоне. Подвижные соединения азота более активно образуются и накапливаются в почвах средней тайги. Соотношение фракций азотных соединений в составе азотного фонда иллювиально-железистых подзолов северной тайги свидетельствует о слабом накоплении аммонийного и в особенности нитратного азота в почвах. Низко здесь и количество щелочногидролизуемого азота, составляющего ближайший резерв азотной пищи растений. Относительное содержание минерального азота в 50-сантиметровом слое почв составляет на севере 1,73% от общего азота (в средней тайге – 3,33%), щелочногидролизуемого – всего лишь 4,9% (в средней тайге – 10,4%), нитратного – 0,03% (в средней тайге – 0,3%). Основная часть азотного фонда представлена негидролизуемым азотом – 91,6% (в средней тайге – 89,3%) (рис. 18).

Таким образом, изучение азотного фонда подзолов северной тайги показало, что минерализация органических азотсодержащих соединений здесь идет значительно медленнее, чем в среднетаежной подзоне, и накопление подвижных форм азота крайне мало. Основная масса азотсодержащих соединений представлена в негидролизуемых формах, недоступных высшим растениям.

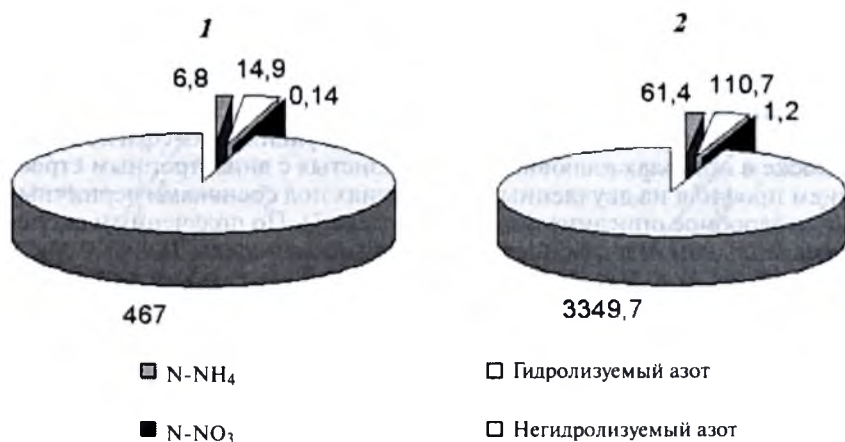


Рис. 18. Фракционный состав азотных соединений в подстилках и 50-сантиметровом слое подзола иллювиально-железистого песчаного на морене. Сосняк черничный 110 лет:

1 – подстилка; 2 – 50-сантиметровый слой (включая подстилку)

## 6.2. Пространственная и временная изменчивость соединений азота в почвах

### Временная изменчивость содержания азотных соединений в почвах в зависимости от гидротермических условий

Содержание элементов минерального питания в почвах крайне изменчиво и подвержено значительным колебаниям как в течение вегетационного периода, так и в отдельные годы (Ковригин, 1952; Егорова, 1958; Левкина, 1962; Арефьева, Колесников, 1964; Морозова, 1964а; Куликова, 1968, 1978; Фирсова, 1977). Исследования проводились в связи с разработкой лесохозяйственных мероприятий по повышению плодородия почв и продуктивности насаждений. Указанным авторам удалось выявить зависимость динамики подвижных веществ от типа почвы, вида напочвенной растительности и климатических особенностей региона исследований.

Нами проанализированы количественные и качественные изменения соединений азота в почвах различного генезиса в зависимости от гидротермических условий. Изучали особенности их валового



накопления, а также сезонную и годичную динамику различных соединений азота в почвах катены: подзолах иллювиально-железистых, иллювиально-гумусово-железистых и торфяных болотных, сформировавшихся на однородных флювиогляциальных песках под сосняками брусничными, черничными и багульниково-сфагновыми, а также в подзолах иллювиально-железистых с анизотропным строением профиля на двучленных отложениях под сосняками черничными (подробное описание почв дано в главе 3). По полученным экспериментальным данным построена следующая модель:  $Ti + Gj + Mk + (Ti \times Gj) + (Ti \times Mk) + (Ti \times Gj \times Mk)$ , где  $Ti$  ( $i = 1, 5$ ) – типы леса;  $Gj$  ( $j = 1, 4$ ) – годы исследований,  $Mk$  ( $k = 1, 3$ ) – месяцы наблюдений.

$$\left. \begin{array}{l} Ti \times Gj \\ Ti \times Mk \\ Gj \times Mk \\ Ti \times Gj \times Mk \end{array} \right\} \begin{array}{l} \text{Изменчивость свойств изучаемых почв} \\ \text{по месяцам и годам} \end{array}$$

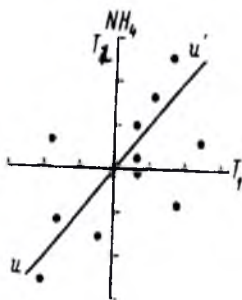
Используя данную модель, провели многофакторный дисперсионный анализ (табл. 39). Для всех исследуемых почв были вычислены оценки трехфакторных взаимодействий ( $Ti \times Gj \times Mk$ ). Для сравнения характера временной изменчивости содержания  $NH_4$  в подзолах и торфяных почвах были построены графики (рис. 19). В прямоугольной системе координат отложили значения эффектов ( $Ti \times Gj \times Mk$ ), на оси абсцисс откладывали оценки эффектов трехфакторных взаимодействий в типе леса 1 (сосняк брусничный), а по оси ординат – в типе леса 2 (сосняк черничный свежий) или 5 (сосняк багульниково-сфагновый).

Таблица 39

Многофакторный дисперсионный анализ содержания аммонийного азота в почвах сосновых лесов

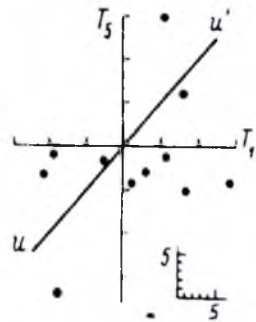
Источник рассеяния	Генетический горизонт							
	1		2		3		4	
	h	F	h	F	h	F	h	F
T	14,21	Зн.	24,15	Зн.	60,53	Зн.	46,22	Зн.
G	5,45	Зн.	6,27	Зн.	2,38	Зн.	5,42	Зн.
M	3,88	Зн.	4,50	Зн.	1,30	Зн.	3,29	Зн.
T × G	21,61	Зн.	11,40	Зн.	4,57	Зн.	18,14	Зн.
T × M	8,03	Зн.	5,48	Зн.	3,46	Зн.	12,07	Зн.
G × M	14,35	Зн.	15,16	Зн.	4,76	Зн.	5,00	Зн.
T × G × M	23,59	Зн.	24,91	Зн.	12,58	Зн.	22,47	Зн.
Остаточное отклонение	3,12	—	6,75	—	14,76	—	2,08	—

Примечание. T – тип леса, G – год, M – месяц. Зн. – значимость дисперсионного отношения со статистической надежностью 97,5%.



Подзолистый горизонт

Лесная подстилка



Иллювиальный горизонт

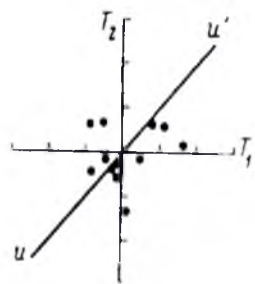
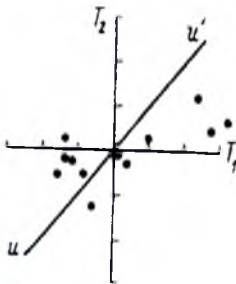


Рис. 19. Характер временной изменчивости содержания  $\text{NH}_4$  в подзолах иллювиально-железистых песчаных сосняков брусничных ( $T_1$ ), иллювиально-гумусово-железистых песчаных сосняков черничных свежих ( $T_2$ ) и торфяных почвах сосняков багульниково-сфагновых ( $T_5$ )

Если характер временной изменчивости аналогичен в сравниваемых типах леса, то точки, соответствующие значениям эффектов, отложатся на прямую линию  $uu'$ , расположенную под углом  $45^\circ$  к осям координат. Если точки находятся далеко от прямой  $uu'$ , то изменчивость в выбранных направлениях по факторам или их комбинациям расходуется. Точки, сконцентрированные около начала координат, соответствуют наиболее стабильным эффектам (изменчивость мала). Чем дальше расположены точки от начала координат, тем большая изменчивость наблюдается в выбранных направлениях по фактору или комбинации факторов.

Погодные условия периодов наблюдения по данным Карельской гидрометеообсерватории приведены в климатограмме (рис. 20). Как

следует из климатограммы, годы исследований существенно отличались друг от друга по среднемесячным температурам вегетационного периода, общей сумме осадков и распределению их по месяцам. Влажность песчаных подзолов на флювиогляциальных отложениях значительно колебалась в зависимости от погодных условий (рис. 21). Уровень влажности лесной подстилки в течение вегетационного периода изменялся в сосняках брусничных от 41 до 135%, в сосняках черничных — от 81 до 212. Причем характер накопления влаги по месяцам в годы наблюдений был различным: наиболее сухой была подстилка в мае первого года наблюдений, в июле этого же года влажность подстилки возросла и в сентябре достигла значительной величины. В следующем году подстилка была влажной весной и осенью, а в середине лета — наиболее сухой. Наибольшая влажность отмечена в органогенных горизонтах торфяных почв сосняков багульниково-сфагновых. В течение вегетационного периода она колебалась от 328 до 784%.

Минеральные горизонты обладают незначительной водоудерживающей способностью, и влажность их низка. В сосняках брусничных она составляет 1,5–8,0%, а в сосняках черничных — 2,0–9,5%; в подзолистом горизонте колеблется от 10 до 17 и от 12 до 22%.

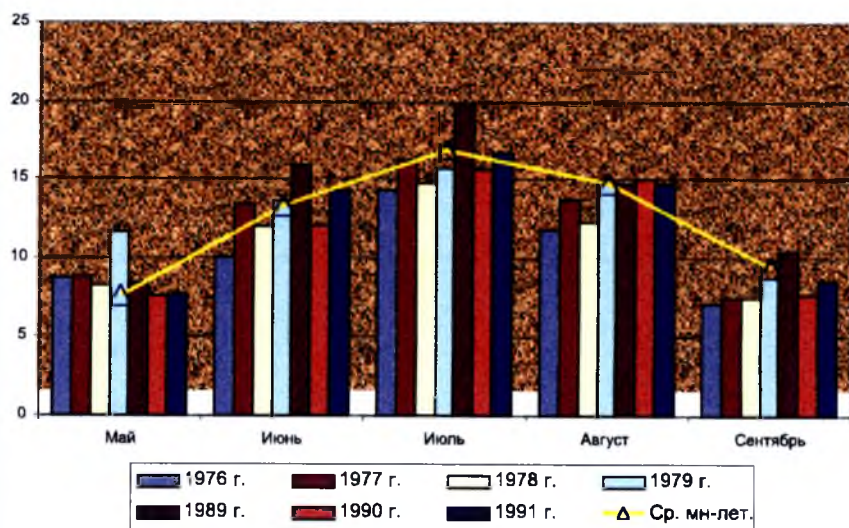
Содержание влаги в лесных подстилках иллювиально-железистых подзолов, сформировавшихся на двучленных отложениях, близко к количеству влаги в органогенных горизонтах подзолов на однородных песках (рис. 22). Что касается минеральных горизонтов, особенно утяжеленного механического состава, то содержание влаги (в весовых процентах) здесь значительно выше. Это не могло не отразиться на микробиологической активности почв и содержании в них различных соединений азота.

Среднемесячные температуры почв в сосняках колебались в тесной зависимости от метеорологических условий года (рис. 23). Но эти колебания были не так значительны, как изменения влажности почв. Как следует из рисунка, наиболее благоприятные температурные условия складываются в подзолах иллювиально-гумусово-железистых сосняков черничных.

### Временная динамика валового содержания азота

Годичная изменчивость содержания общего азота в почвах сосновых лесов тесно связана с влажностью почвы, которая, в свою очередь, зависит от метеорологических условий года. Резкое уменьшение валового содержания азота в почве отмечено в годы с низким количеством поступивших в почву осадков, что четко прослеживается на

### Среднемесячная температура, °С



### Среднемесячная сумма осадков, мм

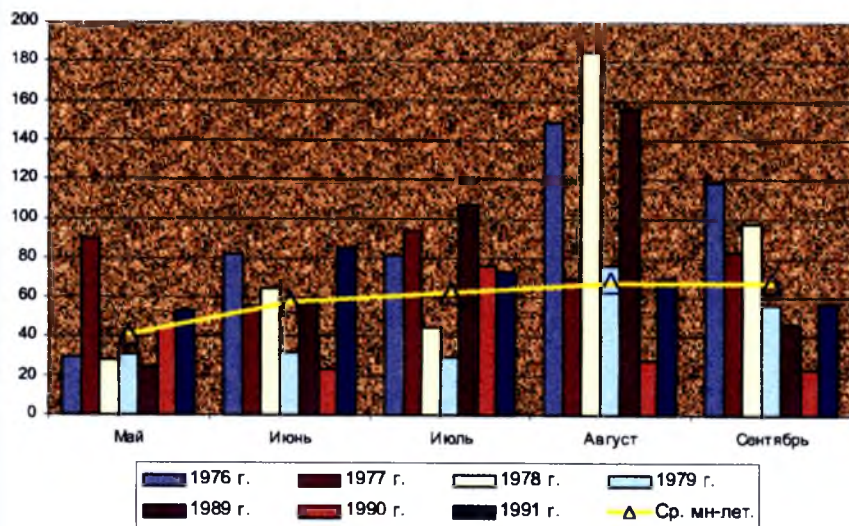


Рис. 20. Климатограмма периодов наблюдений

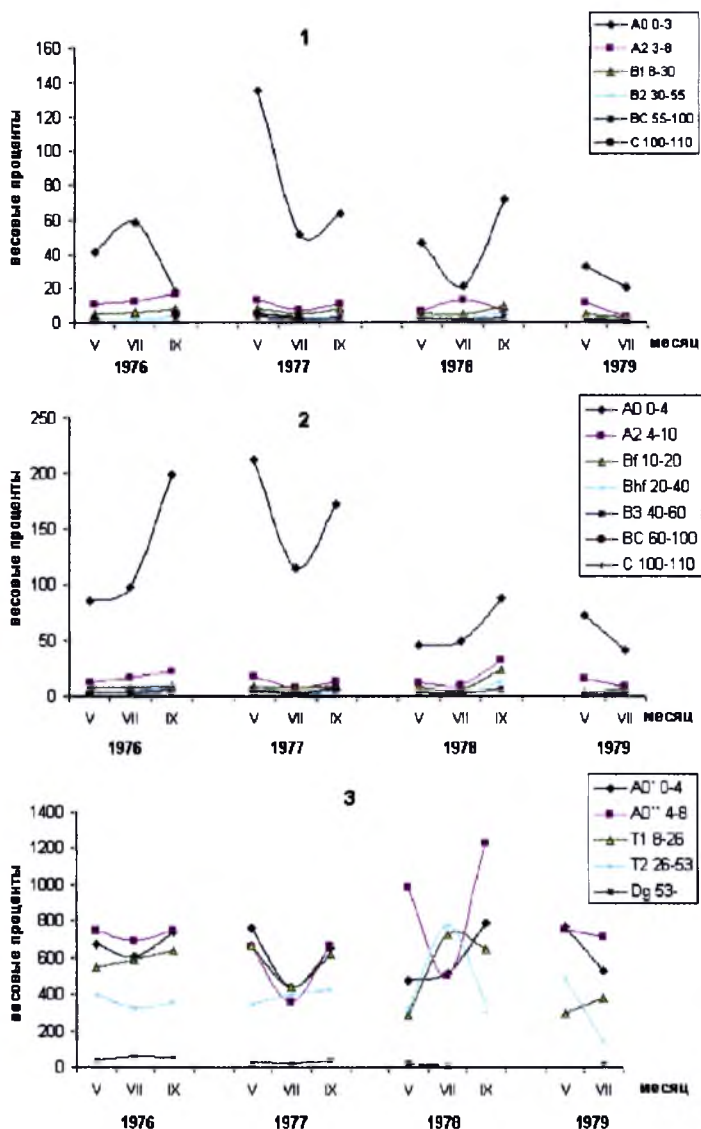


Рис. 21. Влажность почв сосняков экологического ряда в  
весовых процентах:

1 — С. брусничный, подзол иллювиально-железистый песчаный на флювиогляциальных отложениях; 2 — С. черничный свежий, подзол иллювиально-гумусово-железистый песчаный на флювиогляциальных отложениях; 3 — С. багульниково-сфагновый, торфяная переходная



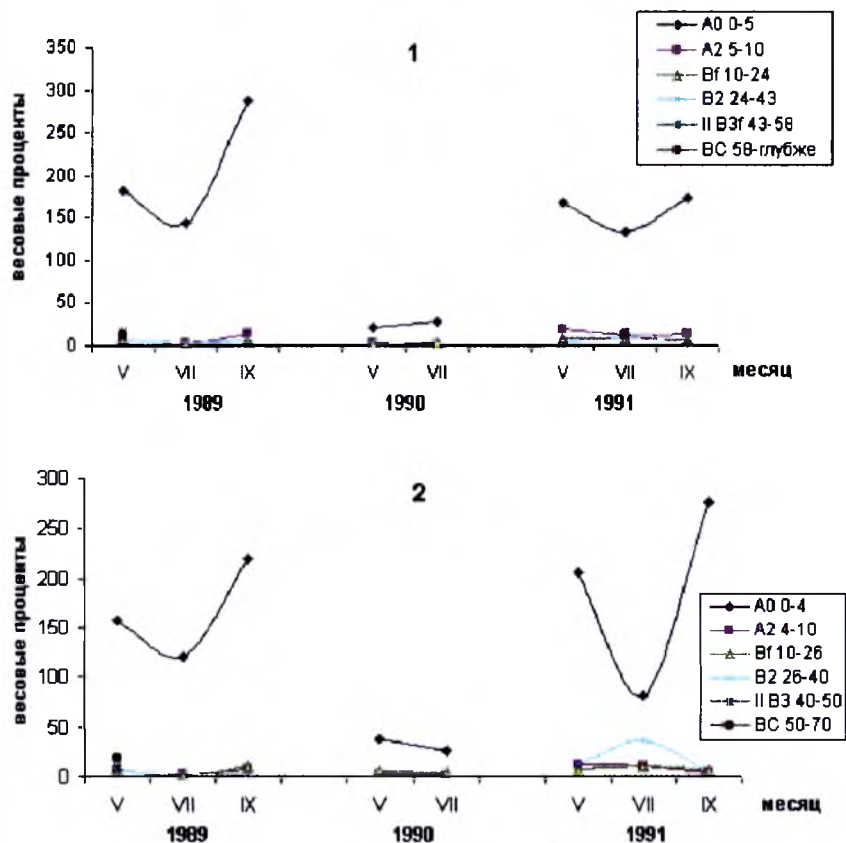


Рис. 22. Влажность почв в сосняках на двучленных отложениях в весовых процентах:

1 – сосняк черничный 165 лет, подзол иллювиально-железистый песчаный; 2 – сосняк черничный 50 лет, подзол иллювиально-железистый песчаный

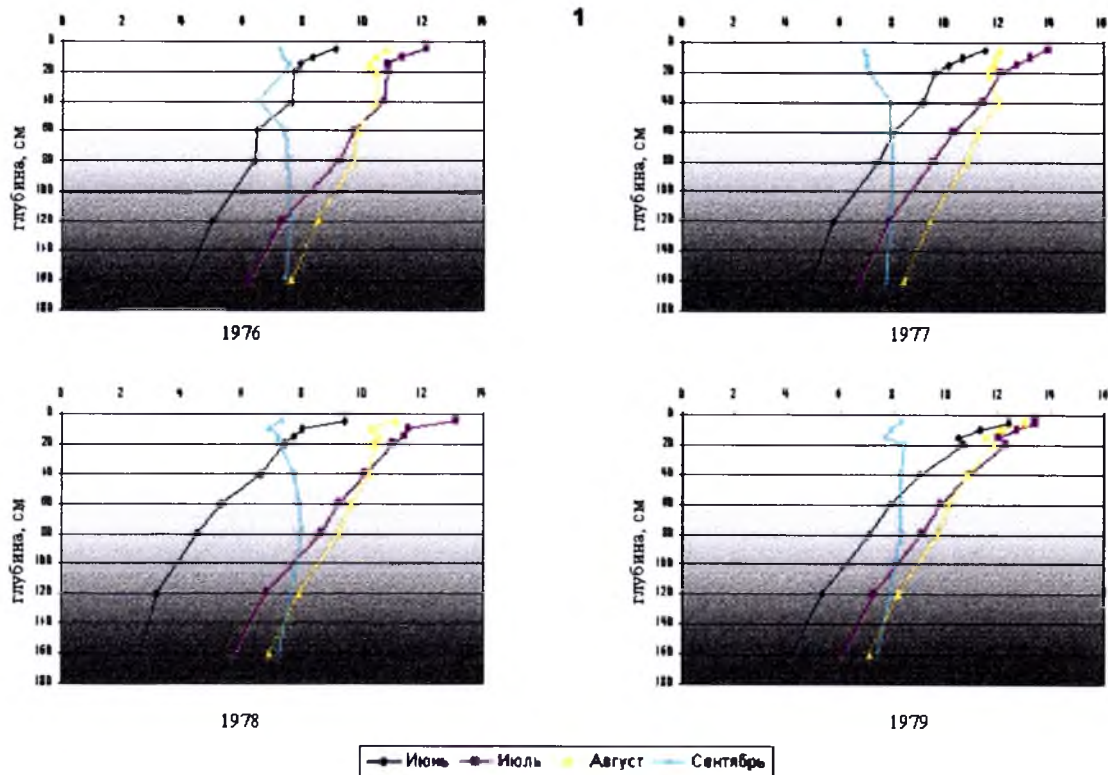


Рис. 23. Среднемесячная температура почв сосняков экологического ряда (Еруков, Власкова, 1986):

1 — сосняк брусничный, подзол иллювиально-железистый песчаный на флювиогляциальных отложениях; 2 — сосняк черничный свежий, подзол иллювиально-гумусово-железистый песчаный на флювиогляциальных отложениях

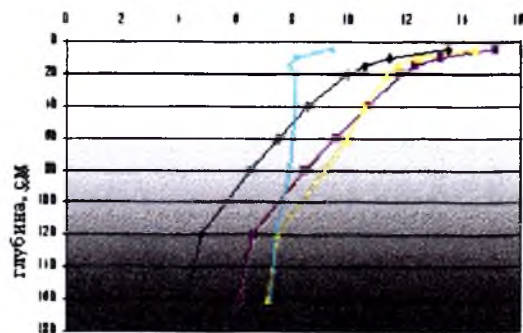
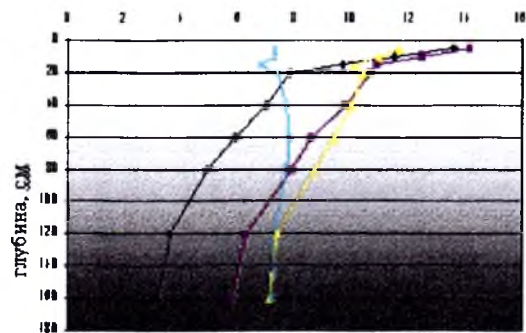
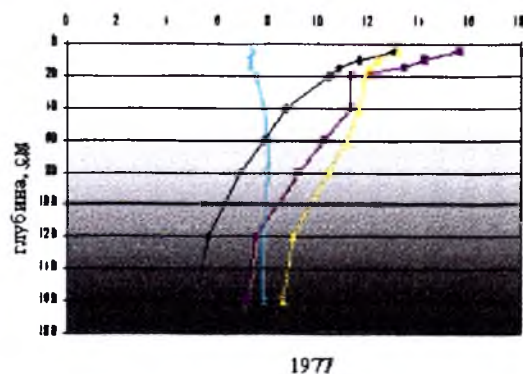
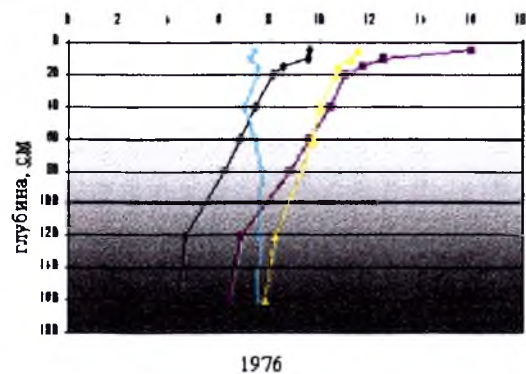


Рис. 23. Окончание

рис. 24. Эта тенденция характерна для всех почвенных горизонтов, а не только органогенного. Валовое накопление азота в большей степени связано с условиями увлажнения, чем с температурным режимом.

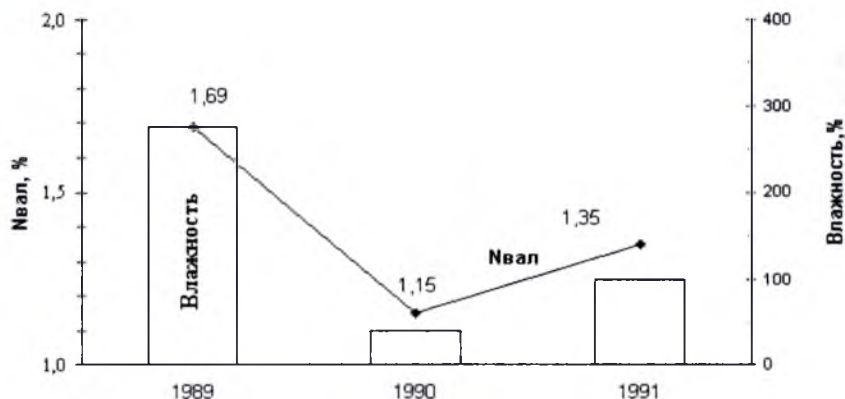


Рис. 24. Динамика валового содержания азота в подстилках подзолов иллювиально-железистых песчаных на двучленных отложениях и их влажность (сосняк черничный свежий)

### Динамика содержания минерального и гидролизуемого азота

Изучение динамики содержания аммиачного азота в почвах сосняков позволило выявить значительные колебания его количества на протяжении вегетационного периода (рис. 25). Обычно максимум отмечается в начале вегетационного периода — в мае — июне, затем происходит постепенное уменьшение его количества в связи с поглощением растениями и некоторыми группами микроорганизмов. К осени уровень его опять возрастает, что можно объяснить увеличением численности аммонификаторов, деятельность которых активизируется с поступлением свежего растительного опада, являющегося хорошим энергетическим материалом.

Содержание аммонийного азота в почвах зависит от гидротермических условий, которые тесно связаны с погодными особенностями года.

Данные по сезонной динамике содержания минерального азота в почве согласуются с данными по накоплению их в растительности,

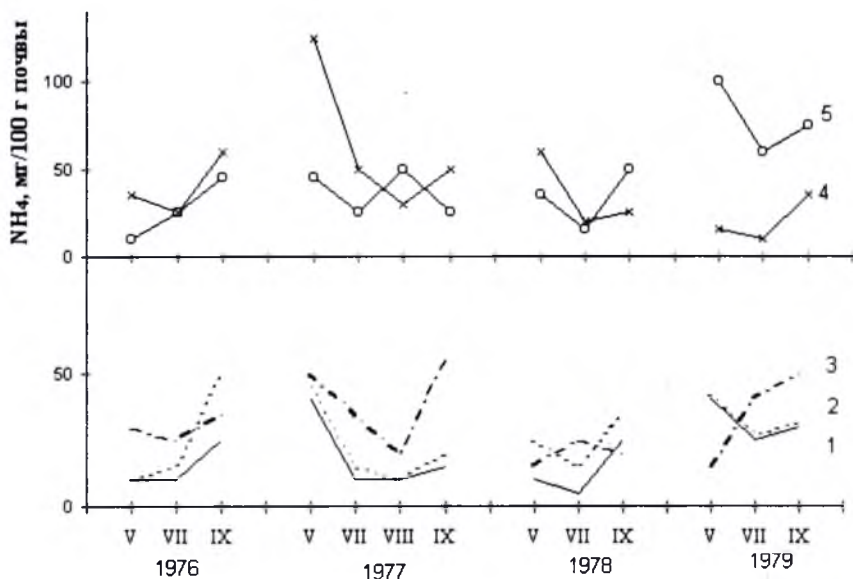


Рис. 25. Динамика содержания аммонийного азота в подстилках подзолов и торфяных почв:

1 — сосняк брусничный; 2 — сосняк черничный свежий; 3 — сосняк черничный влажный; 4 — сосняк кустарничково-долгомошный; 5 — сосняк багульниково-сфагновый

полученными для сосны и ели в Карелии (Куликова, Кищенко, 1979; Новицкая, Чикина, 1980).

Существует четкая связь между содержанием аммонийного азота и влажностью лесных подстилок в автоморфных сосняках. Данные динамики содержания в почвах аммонийного азота в различные по метеорологическим условиям годы свидетельствуют о том, что интенсивность аммонификации в почвах автоморфного ряда тесно коррелирует с количеством осадков и температурой воздуха, с которыми связан гидротермический режим почв. В переувлажненных почвах колебания количества выпадающих атмосферных осадков в меньшей степени отражаются на накоплении аммонийного азота (табл. 40).

Анализируя величины эффектов трехфакторных взаимодействий в сосняках брусничных и черничных свежих (см. рис. 19), установили, что наибольшая изменчивость содержания аммонийного азота



Таблица 40

Динамика содержания аммонийного азота в почвах сосняков экологического ряда по годам, мг на 100 г а. с. почвы

Тип леса, почва	Горизонт, глубина, см	1976 г.	1977 г.	1978 г.	1979 г.
Сосняк брусничный, подзол иллювиально-железистый песчаный на флювиогляциальных отложениях	L 0–2(4)	13	19	12	36
	A2 2(4)–7	0,7	1,0	,4	3,2
	Bf 7–18	1,0	0,9	1,0	2,6
	B2 18–38	1,2	1,0	1,1	2,3
Сосняк черничный свежий, подзол иллювиально-гумусово-железистый песчаный на флювиогляциальных отложениях	L 0–2	27	18	18	31
	F 2–4(6)	23	20	24	40
	A2 4(6)–8	1,2	2,6	3,1	4,2
	Bhf 8–30	1,1	1,4	2,2	3,4
Сосняк черничный влажный, подзол иллювиально-железисто-гумусовый песчаный на флювиогляциальных отложениях	Bf 30–50	1,0	1,9	2,5	1,6
	L 0–3(5)	28	31	22	34
	F 3(5)–9	24	26	21	28
	A0A2 9–13(23)	0,8	3,4	8,7	2,1
Сосняк кустарничково-долгомошный, торфянистый подзол иллювиально-гумусовый песчаный на флювиогляциальных отложениях	Bfh 13(23)–50	1,1	2,0	1,7	2,0
	0 0–13	38	57	37	20
	T1 13–27	31	42	63	35
	A2 27–43	1,1	1,8	1,3	2,0
Сосняк багульниково-сфагновый, торфяная переходная	A2b 43–47	1,0	1,4	1,1	2,1
	Bh 47–53	0,2	1,5	1,2	2,4
	0T0–3(10)	25	45	31	71
	T1 3(10)–16	35	32	63	51
	T2 16–30	27	24	42	42
	T3 30–40	8,8	17	37	50

в подзолах присуща подстилкам, в подзолистых горизонтах она слабее и в иллювиальных горизонтах — наименьшая. Направленность временной изменчивости в подстилках, а также в горизонтах Bf и Bhf близка, а в горизонтах A2 — отличается.

Характер временной изменчивости содержания аммонийного азота в подстилках сосняков брусничных и багульниково-сфагновых, занимающих крайнее положение в экологическом ряду и отличающихся по степени увлажнения, различен.

Дисперсионный анализ экспериментальных данных показал, что влияние фактора Т (тип леса) высокосignificantly относительно содержания в почвах аммонийного азота (см. далее табл. 44). Сила влияния (h) данного фактора уменьшается с глубиной, т. е. в подстилках выше, чем в нижележащих горизонтах. Влияние факторов Г (год) и М (месяц) высокосignificantly.

Содержание в почвах аммонийного азота существенно изменяется как в течение вегетационного периода, так и по годам во всех типах леса и во всех генетических горизонтах. Наибольшим колебаниям подвергается содержание аммония в лесной подстилке.

Выявлена сезонная динамика содержания нитратов в почве. Общим для всех типов леса является снижение его летом, связанное с поглощением растительностью, и некоторое увеличение к осени, в результате прекращения вегетации (рис. 26).

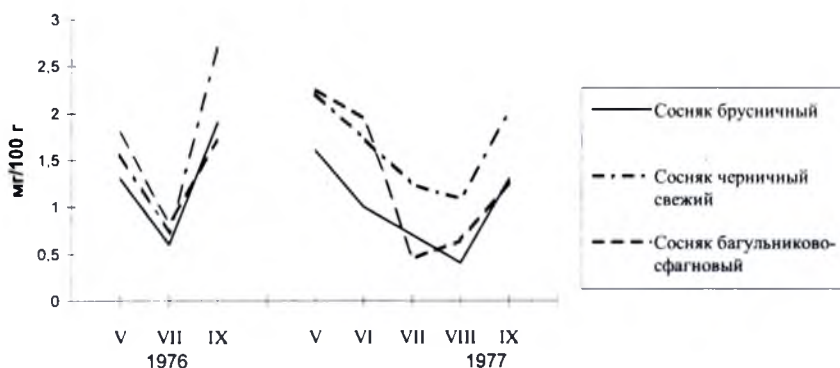


Рис. 26. Динамика содержания нитратного азота в подстилках подзолов илювиально-железистых, илювиально-гумусово-железистых песчаных и торфяных переходных почв на флювиогляциальных отложениях в сосняках экологического ряда

Количество в почвах щелочногидролизуемого азота в течение вегетационного периода также подвержено значительным колебаниям (рис. 27). В лесных подстилках подзолов максимум гидролизуемого азота определен в июле, что можно объяснить активизацией микробиологической деятельности в связи с благоприятными гидротермическими условиями в летний период. В торфяных почвах динамика щелочногидролизуемого азота выражена не четко.

Поскольку установили, что динамика подвижных азотсодержащих соединений в почвах связана, с одной стороны, с гидротермическими условиями, складывающимися в почвах в течение вегетационного периода в зависимости от метеорологических особенностей года, а с другой — с интенсивностью поглощения их растительностью, то исследовали их сезонную динамику в почвах сосняков разного возраста. Однако выявить какие-либо общие закономерности сезонной

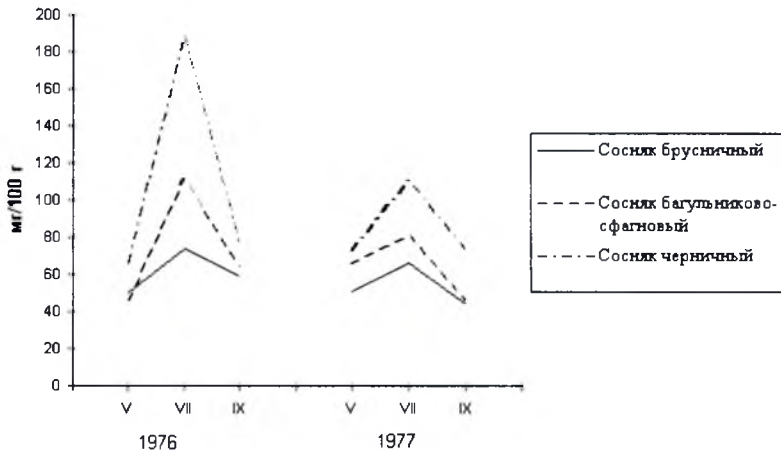


Рис. 27. Динамика содержания щелочногидролизуемого азота по Корн-филду в подстилках сосняков экологического рьяда

динамики минерального и лабильного азота в органогенной части профиля почв оказалось довольно сложно. Данные свидетельствуют о различиях в характере сезонной изменчивости в подстилках минерального азота в сосняках разного возраста. В перестойных насаждениях (165 лет) прослеживается тенденция накопления минерального азота в середине вегетационного периода, т. е. в наиболее благоприятных условиях для жизнедеятельности микроорганизмов, ответственных за переход органических форм азота в простые минеральные соединения, в то время как в средневозрастных насаждениях, активно поглощающих минеральный азот, в середине лета отмечается снижение содержания его в почве, что характерно также для подзолов на однородных песках. Особый характер динамики минерального азота в подзолах 50-летнего сосняка можно объяснить чрезвычайной сухостью в начале вегетационного периода (рис. 28). Динамика лабильного органического азота в почве не имеет четко выраженного характера (рис. 29). Исследование погодичной изменчивости количества минерального и гидролизуемого азота в лесных подстилках сосняков разного возраста свидетельствует о том, что более стабильным является содержание минерального азота в органогенных горизонтах почв 165-летнего насаждения. Характер годичной динамики как минерального, так и легкогидролизуемого азота в почвах 50-летнего насаждения аналогичен, наблюдаются колебания то в сторону уменьшения, то увеличения (рис. 30).

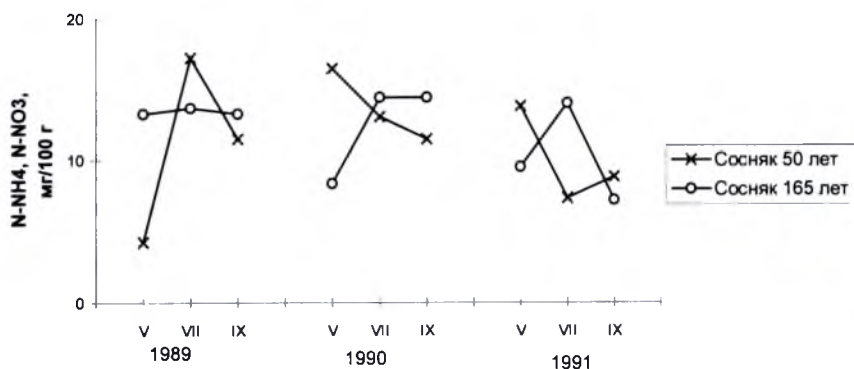


Рис. 28. Сезонная динамика содержания минерального азота в подстилках подзолов иллювиально-железистых песчаных на двучленных отложениях в сосняках черничных разного возраста

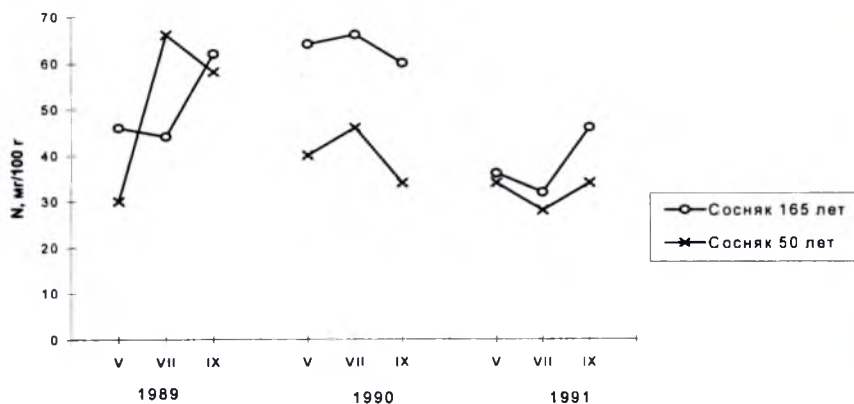


Рис. 29. Сезонная динамика содержания лабильного азота в подстилках подзолов иллювиально-железистых песчаных на двучленных отложениях в сосняках черничных разного возраста

Исследования сезонной изменчивости содержания аммонийного и нитратного азота проводили также и в элювиально-поверхностно-глееватых почвах на ленточных глинах в средневозрастных ельниках черничных. Выявлено, что максимум содержания аммония в почвах приходится на июнь и сентябрь (рис. 31), в середине вегетационного периода его количество снижается. Следует отметить идентичность

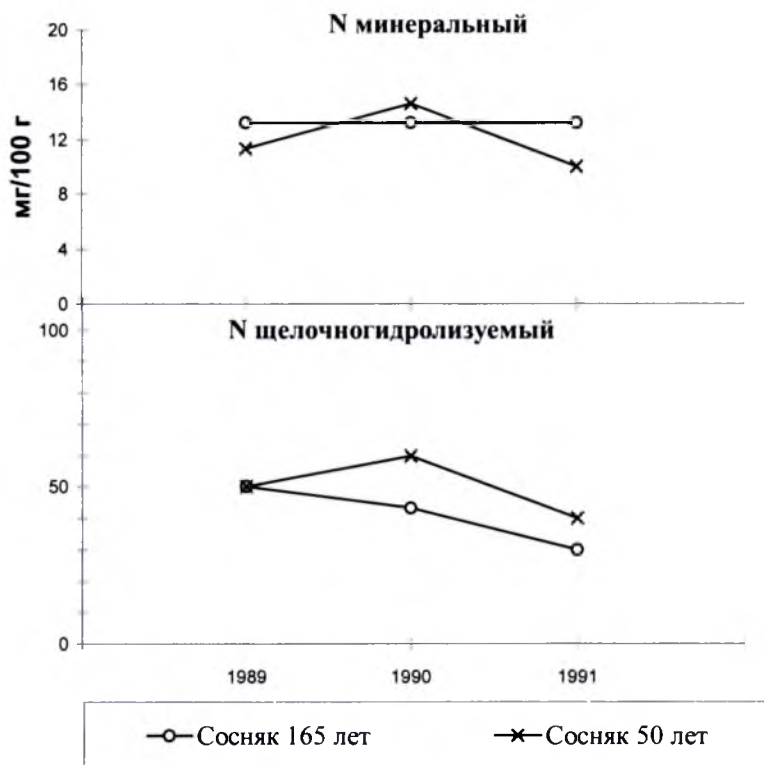


Рис. 30. Годичная динамика содержания подвижных азотных соединений в подстилках подзолов иллювиально-железистых песчаных на двучленных отложениях в сосняках черничных разного возраста

характера динамики минерального азота в почвах средневозрастных еловых и сосновых насаждений.

Таким образом, установлено, что содержание в почве азотных соединений изменяется как по годам, так и по сезонам года. Это связано с изменчивостью гидротермической обстановки в почве, зависящей от метеоусловий. Данная зависимость в большей мере проявляется в почвах с нормальным увлажнением.

Характер динамики подвижного азота, в первую очередь минерального, зависит также и от возраста насаждений, с которым связана интенсивность поглощения почвенного азота растительностью.



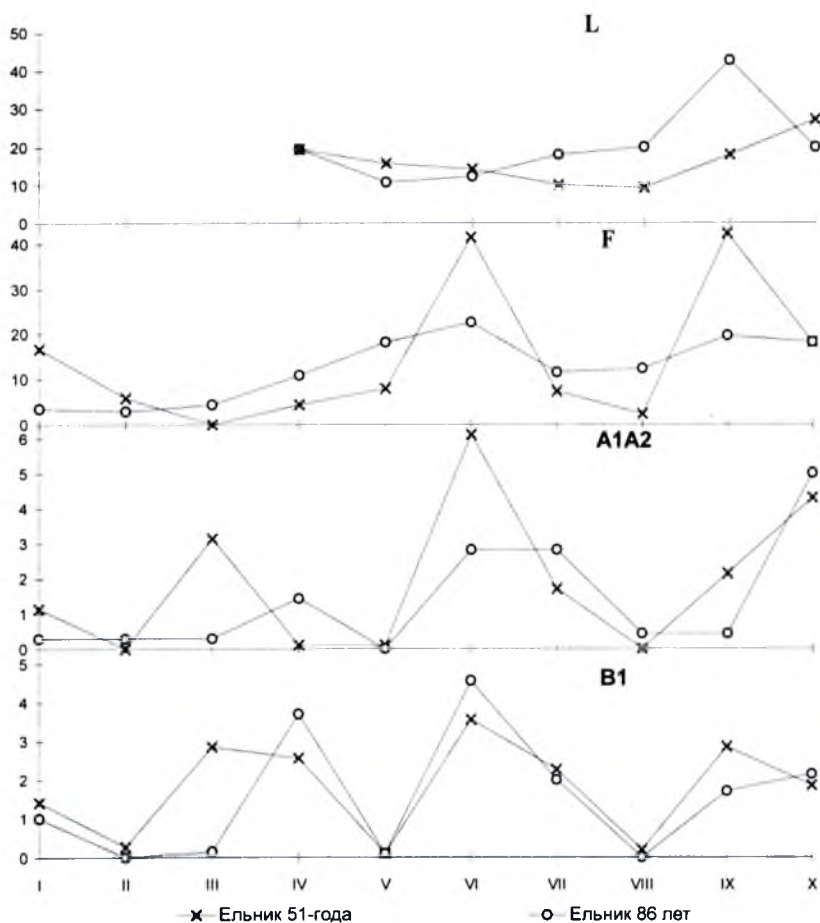


Рис. 31. Динамика аммиачного азота в элювиально-поверхностно-глееватых почвах на ленточных глинах в ельниках черничных

### Пространственное варьирование содержания аммонийного азота в почвах

Изучение пространственной вариабельности содержания обменного аммония проводили в подзолах иллювиально-железистых песчаных под сосняками лишайниковыми и брусничными. Образцы почв

отбирали в середине вегетационного периода (июль). При отборе образцов были учтены основные группировки растительности и их местоположение среди древостоя. Результаты проведенных анализов свидетельствуют о значительных колебаниях содержания аммония в почве в зависимости от строения напочвенного покрова в биогеоценозе. Наибольшие различия в количестве обменного аммония наблюдались в лесной подстилке, причем более сильные отклонения были в почвах сосняка брусничного (13,9–45,4 мг на 100 г почвы). На мертвопокровных участках, где отсутствовал напочвенный растительный покров, содержание обменного аммония в подстилке было в 2,5 раза ниже (13,9 мг на 100 г), чем на участке с покровом из зеленых мхов и брусники (45,4 мг на 100 г). В лесной подстилке под одними зелеными мхами без кустарничков содержание аммония составляет 27,9 мг в связи с низким содержанием его во мхах. В минеральных горизонтах колебания содержания аммония менее значительны (от «следов» до 1,5 мг на 100 г) (табл. 41). Статистическая

Таблица 41

Содержание обменного аммония в почве в зависимости от парцеллярного строения сосновых фитоценозов (от ствола к стволу), мг на 100 г а. с. почвы

Сосняк брусничный					Сосняк лиственный				
Парцеллы и положение в древостое					Парцеллы и положение в древостое				
Глубина, см	Зелено-мошное «окно»	Мертво-покровная группа	Бруснично-зеленомошное «окно»	Бруснично-зеленомошное «окно»	Глубина, см	Лишайниковая, «окно»	Мертво-покровная, 1 м от ствола	Вересково-бруснично-зеленомошная, «окно»	Вересково-бруснично-зеленомошная, «окно»
0-3	27,9	27,4	13,9	22,4	45,4	39,4	20,9	26,2	35,0
3-7	0,89	0,94	0,88	1,27	Не опр.	2,02	1,32	1,48	1,94
7-15	1,04	Следы	1,32	1,56	Следы	Следы	1,19	0,97	0,96
15-30	0,86	Не опр.	0,79	1,01	1,05	Следы	1,00	1,04	0,91
40-50	Следы	1,01	0,83	0,93	0,87	0,75	1,04	0,28	Следы
60-70	0,36	0,76	Не опр.	0,71	Нег	0,83	Следы	0,24	0,68
80-90	0,82	0,74	Не опр.	0,94	Нег	0,83	0,22	Нег	Нег
					80-90	0,74	0,30	Нег	Нег
									Следы

Варьирование содержания обменного аммония в почве в зависимости от парцеллярного строения сосновых фитонензов

Сосняк брусничный							Сосняк лиственный						
Глубина взятия образца, см	$M \pm m$		$\sigma$	$v$	$\rho$	Необходимая повторность $P_{0,95}$	Глубина взятия образца, см	$M \pm m$	$\sigma$	$v$	$\rho$	Необходимая повторность $P_{0,95}$	
			%		%								
0-3	$27,4 \pm 5$	11,5	42	18	68	48	0-3	$29,0 \pm 2,9$	7,1	24	10	22	18
3-7	$0,99 \pm 0,09$	0,18	19	9	13	9	3-7	$1,65 \pm 0,16$	0,4	24	9	22	15
7-15	$0,78 \pm 0,3$	0,07	94	42	241	241	7-15	$0,91 \pm 0,19$	0,2	50	20	99	70
15-30	$0,92 \pm 0,06$	0,12	13	6	6	4	15-30	$0,86 \pm 0,17$	0,2	49	20	95	67
40-50	$0,72 \pm 0,1$	0,40	56	25	123	87	40-50	$0,67 \pm 0,017$	0,4	64	26	160	113
60-70	$0,60 \pm 0,05$	0,20	35	12	20	49	60-70	$0,43 \pm 0,16$	0,3	92	37	237	232
80-90	$0,83 \pm 0,06$	0,60	12	7	5	4	80-90	$0,71 \pm 0,25$	0,4	62	36	150	106

обработка данных (табл. 42) (дисперсионный анализ) показывает довольно высокую вариабельность содержания обменного аммония в зависимости от строения напочвенного покрова. При статистической обработке этого материала мы заведомо вводим некоторые допущения: во-первых, участки парцелл рассматриваются как повторности (на пробной площади в сосняке брусничном — 5, в сосняке лишайниковом — 6); во-вторых, каждый почвенный образец был взят в нескольких повторностях (подстилки в 10-кратной, минеральные — в 5-кратной); в-третьих, при отборе почвенных образцов мы заведомо подбирали более контрастные участки по отношению друг к другу. При таком допущении вариабельность содержания элемента получается значительно выше. Особенно высокая вариабельность выявляется при небольших количественных показателях того или иного химического элемента (начиная от «следов» или полного отсутствия до нескольких миллиграммов). В этих случаях необходимая повторность при относительной точности 10% должна быть выше.

Следует отметить, что полученная при статистической обработке высокая «необходимая повторность» образцов при низком содержании химичес-

кого элемента (до 1 мг на 100 г) вряд ли оправдана. Это важно лишь при проведении методических работ.

### 6.3. Аммонифицирующая и нитрифицирующая способность почв

Потенциальная способность почв к разложению азотсодержащих соединений хорошо отражает уровень трофности почв и является одним из объективных показателей ее биологической активности. Этот биохимический метод используется для учета усвояемого азота в почве и дает достаточно хорошее соответствие с урожаем (Ремезов, 1941; Орфанитский и др., 1960; Болотина, Абрамова, 1964; Федорова, Шумаков, 1973; Никифорова, 1974; Кыдар, 1978; Федоренко, 1978; Попова, Лубите, 1979; Попова, 1983; Kusel, Drake, 1999). Простым и весьма надежным методом изучения превращения органических соединений азота в почве в минеральные является метод компостирования. В основе метода лежит определение накопления в почве нитратов и аммиака при оптимальных гидротермических условиях. Оптимальной влажностью для развития интенсивной микробиологической деятельности принято считать влажность почвы, равную 60% от полной влагоемкости, а оптимальной температурой — 25–28 °С.

Величина интенсивности нитрификации является довольно характерной для каждого типа почвы. Компостирование длится обычно 7–14 дней по Немецу; 30 дней — по Ваксману (Болотина, Абрамова, 1964). Иногда применяют более длительное компостирование — до 3 месяцев — с целью выявить предельную потенциальную способность почвы к накоплению нитратов.

Как указывали многие исследователи (Ремезов, 1938, 1941; Шумаков, 1948), в лесных почвах под пологом хвойных лесов процессы аммонификации преобладают над процессами нитрификации. Это связано с повышенной кислотностью, составом органического вещества, влажностью почвы и т. д.

Исследование аммонифицирующей и нитрифицирующей способности почв проводили в сосняках экологического ряда на однородных песках и в сосняках черничных, сформировавшихся на двучленных отложениях.

Во всех исследованных почвах количество аммонийного азота значительно выше, чем нитратного. После 14-дневного компостирования (табл. 43) содержание аммонийного азота было также значительно выше, чем содержание нитратного азота. Нитрификация шла во всех почвах, но интенсивность ее была значительно ниже интенсивности

аммонификации. За интенсивность аммонификации и нитрификации принимали разность в содержании нитратов и обменного аммония до и после компостирования.

Таблица 43

Аммонифицирующая и нитрифицирующая способность почв сосняков экологического ряда, мг на 100 г а. с. почвы

Почва, тип леса	Горизонт, глубина, см	Содержание N-NH <sub>4</sub>			Содержание N-NO <sub>3</sub>		
		до ком- пости- рования	через 14 дней	разни- ца	до ком- пости- рования	через 14 дней	разни- ца
Подзол иллю- виально- железистый пес- чаный, сосняк брусничный	0 0–3	51,3	39,1	–12,2	1,25	2,65	1,40
	A2 3–8	3,7	2,3	–1,4	0,18	0,19	0,01
	Bf 8–30	3,0	2,9	–0,1	0,07	0,17	0,10
	B2 30–55	1,7	1,7	0	0,07	0,11	0,04
	BC 55–100	1,6	1,5	–0,1	0,07	0,07	0
	C 100–110	1,4	1,1	–0,3	0,06	Не опр.	Не опр.
Подзол иллюви- ально-гумусово- железистый песчаный, сосняк чернич- ный свежий	0 0–4	38,1	49,9	11,8	1,70	2,90	1,20
	A2 4–10	3,7	6,1	2,4	0,16	0,54	0,38
	Bhf 10–20	3,4	4,3	0,9	0,14	0,29	0,15
	Bf 20–40	2,4	2,7	0,3	0,09	0,09	0
	B3 40–60	1,9	2,1	0,2	0,09	0,11	0,02
	BC 60–100	1,8	1,8	0,1	0,09	0,09	0
	C 100–120	1,6	1,7	0,1	0,11	0,11	0
Торфяная пере- ходная, сосняк багульниково- сфагновый	L 0–4	128,2	168,6	40,4	1,46	8,50	7,05
	F 4–8	53,1	98,8	45,7	1,20	7,50	6,35
	T1 8–26	40,6	48,7	8,1	1,15	1,70	0,55
	T2 26–53	16,5	23,3	6,8	0,54	1,10	0,57
	Dg 53–глубже	3,5	2,7	–0,8	0,16	0,16	0

Наиболее интенсивно аммонификация протекала в торфяных почвах сосняков багульниково-сфагновых. В образцах лесных подстилок этого типа леса за 14 дней компостирования накопилось 43,1 мг N-NH<sub>4</sub> на 100 г почвы. Менее интенсивной была аммонификация в подстилках сосняков черничных, где за 14 дней компостирования накопилось 11,8 мг N-NH<sub>4</sub> на 100 г почвы. В подстилках сосняков брусничных за 14 дней компостирования количество аммонийного азота не увеличилось.

Процесс нитрификации наиболее интенсивно протекал в торфяных почвах сосняков багульниково-сфагновых. Интенсивность нитрификации в горизонте 0 была равна 6,7 мг на 100 г почвы, в лесных подстилках сосняков черничных и брусничных – около 2,4–1,4 мг N-NO<sub>3</sub> на 100 г почвы.

Полученные данные отчетливо показывают, что процессы аммонификации и нитрификации при оптимальных условиях температуры



и влажности протекают, в основном, в органогенных горизонтах торфяных почв и лесных подстилках почв автоморфного ряда. В минеральных горизонтах эти процессы выражены значительно слабее, интенсивность нитрификации не превышает в них 0,4 мг, а аммонификации — 2,4 мг на 100 г почвы. Известно, что интенсивность биохимических процессов тесно связана с наличием в почве углерода и азота (Ершов, Кузьмина, 1965; Третьякова, 1977). Наибольшее накопление аммиака и нитратов при оптимальных температуре и влажности было присуще почвам и почвенным горизонтам, наиболее богатым органическим веществом и общим азотом. Эти наблюдения согласуются с результатами исследований и других авторов (Бугаков, Лубите, 1969; Узун, Алексеева, 1974).

В результате математической обработки данных получены коэффициенты корреляции между валовым содержанием азота в почве и интенсивностью аммонификации и нитрификации. Тесная прямая корреляционная зависимость установлена между этими показателями в подзолах, в торфяных почвах эта взаимосвязь менее тесная (табл. 44). Спорным является вопрос об интенсивности процессов аммонификации и нитрификации при оптимальных температуре и влажности в образцах, отобранных в разные сроки. Одни авторы считают, что срок отбора образцов не влияет на эти показатели (Болотина, Абрамова, 1964), другие исследователи (Кудеяров, Рынкс, 1967) установили взаимосвязь срока отбора и в последующем определенной в лаборатории интенсивности аммонификации и нитрификации. Проведенные нами исследования показали, что в образцах, отобранных летом, показатели аммонифицирующей и нитрифицирующей способности выше, чем в почвах весеннего и осеннего сроков отбора.

Таблица 44

Коэффициенты корреляции между валовым содержанием азота и интенсивностью аммонификации и нитрификации в почвах сосняков экологического ряда

Тип леса, почва	$K_1$	$K_2$
Сосняк брусничный, подзол иллювиально-железистый песчаный	0,733	0,932
Сосняк черничный свежий, подзол иллювиально-гумусово-железистый песчаный	0,785	0,783
Сосняк багульниково-сфагновый, торфяная переходная	0,447	0,437

*Примечание.*  $K_1$  — коэффициент корреляции между валовым содержанием азота и интенсивностью аммонификации,  $K_2$  — между валовым содержанием азота и интенсивностью нитрификации.

Подобное явление объясняется, вероятно, тем, что летом в почвах накапливаются лабильные органические соединения азота, наиболее доступные минерализации, активизируются микробиологические процессы и в то же время конечные продукты аммонификации и нитрификации интенсивно поглощаются растениями и некоторыми группами микроорганизмов. В лабораторных условиях поглощение минеральных соединений азота растениями исключено, поэтому и обнаруживаются при компостировании летних образцов их повышенные количества.

### Выводы

Содержание азотных соединений в почвах хвойных лесов тесно связано с уровнем их увлажнения. По мере нарастания влажности почв количество общего, гидролизуемого и аммонийного азота в корнеобитаемом слое возрастает.

Содержание подвижных азотсодержащих соединений в автоморфных почвах находится в прямой корреляционной зависимости от количества органического вещества и общего азота. В торфяных почвах эта корреляция менее тесная, так как большое накопление подвижного азота в этих почвах объясняется слабым использованием его растительностью в условиях избыточного увлажнения и накоплением в почве.

Запасы азота в почвах тесно связаны с их гранулометрическим составом. В подзолах, сформировавшихся на двучленных отложениях, запасы азота в 2 раза выше, чем в аналогичных почвах на однородных песках.

Количество общего азота в элювиально-поверхностно-глееватых почвах ельников в 1,5 раза выше, чем в подзолах высокопродуктивных сосняков.

Разложение органических остатков в изучаемых почвах идет, в основном, до стадии аммиака, нитрификация выражена слабо. Причиной, тормозящими процессы нитрификации, являются высокая кислотность, пониженные температуры и избыточное увлажнение торфяных почв. В результате количество аммиачного азота значительно преобладает над содержанием нитратов.

При оптимальных условиях температуры и влажности (лабораторный опыт) процесс аммонификации протекает значительно интенсивнее, чем процесс нитрификации. Заторможенность нитрификации обусловлена, помимо отмеченных региональных особенностей почв, наличием специфических продуктов разложения подстилок (воскосмолы, лигнины). Интенсивность аммонификации и нитрификации

находится в прямой корреляционной зависимости от содержания в почвах общего азота. Указанные процессы протекали, в основном, в лесных подстилках. В минеральных горизонтах подзолов интенсивность аммонификации выражена слабо, а нитрификация практически отсутствует.

Для почв хвойных лесов характерно высокое содержание негидролизуемого азота (90–97%) и бедность их минеральным (1,8–3,0%) и гидролизуемым азотом (7,4–10% от общего). Относительное содержание минерального и гидролизуемого азота в составе азотного фонда уменьшается по мере увеличения увлажненности почв. В подзолах эта величина выше, чем в торфяных почвах сосновых лесов, что свидетельствует о большей подвижности азота в подзолах, чем в торфяных почвах.

Минерализация органических азотсодержащих соединений в лесных почвах северотаежной подзоны идет медленнее, чем в среднетаежной, и накопление лабильных форм мало.

В подстилках почв еловых лесов относительное содержание минерального азота выше, чем в сосняках, а в 50-сантиметровом слое почвы, включая минеральные горизонты, в несколько раз меньше, что связано с неблагоприятными для минерализации азота гидротермическими особенностями тяжелых глинистых почв.

Выявлена динамика общего азота в почвах в различные по метеорологическим условиям годы. Причем накопление общего азота в большей степени зависит от уровня увлажнения, чем от температурного режима.

Сезонная динамика минерального и гидролизуемого азота в почвах тесно связана с погодными условиями, определяющими биологическую активность почв, и периодом вегетации растений. При этом характер динамики в почвах в значительной степени связан с возрастом насаждений. В средневозрастных насаждениях максимальное содержание аммиачного и нитратного азота приурочено к весеннему и осеннему периодам. Во время интенсивного роста древесных растений (летом) содержание минерального азота в почвах находится в минимуме. Резкое снижение содержания этих соединений азота в почвах свидетельствует о напряженном режиме азотного питания сосновых древостоев. В тех же типах почв, но в перестойных насаждениях максимум подвижного азота накапливается в почвах в летний период, наиболее благоприятный для функционирования микробоценоза.

## Глава 7

# БИОЛОГИЧЕСКИЙ КРУГОВОРОТ СОЕДИНЕНИЙ УГЛЕРОДА И АЗОТА В ЛЕСНЫХ БИОГЕОЦЕНОЗАХ

### 7.1. Динамика соединений углерода и азота в системе растение — почва

Круговорот азота в лесных биогеоценозах — сложный и многообразный процесс, в котором участвуют группы растений, различающиеся по циклам развития, химическому составу и требовательности к элементам питания. Взаимоотношения между растениями и почвой являются наиболее важным звеном. Почвы хвойных лесов бедны доступным для растений азотом, вследствие чего во многих случаях наблюдается слабое развитие хвойных пород (Ремезов, 1941; Шумаков, 1948; Орлов, Кошельков, 1971; Казимиров, Морозова, 1973; Казимиров и др., 1974б; Морозова, Федорец, 1992; Федорец и др., 2000). Зная потребность в азоте отдельных древесных пород, а также насаждений различной продуктивности, можно регулировать интенсивность биологического круговорота, т. е. изменять режим питания, и таким образом значительно повышать рост деревьев и продуктивность насаждений. В Карелии ежегодный прирост фитомассы лесных насаждений одного возраста зависит от экологических условий. Прирост фитомассы сосняка вересково-лишайникового составляет 6,33 т, сосняка черничного свежего — 8,93 т · га<sup>-1</sup>. Прирост фитомассы насаждения в автоморфном ряду возрастает от сосняка вересково-лишайникового к сосняку черничному свежему, затем с увеличением уровня увлажнения постепенно снижается и в сосняке багульниково-сфагновом приближается к приросту сосняка вересково-лишайникового. Наибольшую часть прироста дает древостой — 73–94%. Прирост напочвенного покрова составляет 6–17%, причем в наименее производительных насаждениях он выше, чем в более производительных. Наибольшую долю в приросте древостоя дает прирост стволов, затем хвои и листьев (20–31), прирост ветвей составляет 13–17, корней 18–19%. Это соотношение сохраняется во всех типах леса, но с некоторыми колебаниями. Довольно значительный прирост дает напочвенная растительность, хотя запас ее достигает 3–11%. Основную часть прироста напочвенного покрова составляют кустарнички, затем, в зависимости от

типа леса, лишайники и травы. Наименьший прирост дают мхи (Казимиров и др., 1977; Федорец, Морозова, 1985). В насаждениях происходит не только прирост, но и опад органического вещества в виде отмерших органов и целых растений. В спелых и перестойных древостоях он составляет 90%, в то время как в молодых и приспевающих — меньше половины от годичного прироста (Ремезов и др., 1959). В средневозрастных сосняках с полнотой около 0,8 масса опада невелика — 3,4–5,1 т · га<sup>-1</sup>. Чем ниже плодородие почв, тем меньше отмерших органических остатков поступает в почву. В лесных насаждениях древостой дает основную массу опада, однако величина его в составе общего опада колеблется в зависимости от экологических условий от 60% в сосняке багульниково-сфагновом до 89% в сосняке вересково-лишайниковом. В нем больше всего тех органов деревьев, продолжительность жизни которых невелика, т. е. хвои. Опад органического вещества с отмирающими ветвями и шишками (18–22%) мало изменяется по типам леса. Довольно высок и отпад стволовой древесины — 17–27%, а корней сравнительно невелик — 9–11% от общей массы.

Количество опада растений напочвенного покрова связано с типом леса, оно возрастает от сухих местообитаний к более влажным и составляет 11–40% в общем опаде насаждения. Основную его массу в сосновых лесах дают кустарнички (около 80%), затем мхи, лишайники, травы. Поступление опада на поверхность почвы в сосновых насаждениях происходит круглогодично, почти равномерно в течение года, однако соотношение отдельных его компонентов в разные сезоны различно. Хвоя наиболее интенсивно опадает осенью, после завершения вегетации, ветви — зимой, в результате облома их под тяжестью снега. В зимний период опадает больше коры, в летний — основная масса шишек, особенно в годы с обильным цветением сосны. Листовой опад (хвоя, мелкие ветви, семена, мхи, лишайники, листья и ветви кустарничков) сосновых насаждений составляет более 60% общего, и именно он играет основную роль в круговороте химических элементов в системе почва — растение. Отмершие растительные остатки подвергаются минерализации и гумификации. В условиях прохладного климата Карелии эти процессы протекают медленно, и на поверхности почвы формируется органогенный слой — лесная подстилка.

В ельниках, как и в сосновых лесах, прирост фитомассы зависит от экологических условий. В автоморфных условиях он колеблется от 3,55 т · га<sup>-1</sup> в ельниках лишайниково-каменистых до 9,15 т · га<sup>-1</sup> в ельнике кисличном. В переувлажненных лесах снижается до 4,83–5,73 т · га<sup>-1</sup> (ельник долгомошный и болотно-травяной). Наибольшую часть прироста дает древостой (87–97%). Прирост растений



напочвенного покрова составляет 2,1–7,0%, уменьшаясь от более производительных типов леса к менее производительным. В переувлажненных насаждениях он наиболее высок – 13,0–13,6%.

Наибольшую роль в приросте древостоя играет прирост стволов (около 40%), затем прирост хвои (36–37%), корней (12–13%). Это соотношение сохраняется во всех типах леса. Значительный прирост дают растения напочвенного покрова, в основном мхи, а затем, в зависимости от типа леса, лишайники или травы. Прирост кустарничков невелик.

Величина опада фитомассы насаждений тесно связана с его запасами, следовательно, с типом леса. С увеличением производительности насаждений в автоморфном ряду масса опада увеличивается от ельника лишайниково-каменистого до ельника кисличного, т. е. от 2,11 до 5,6 т · га<sup>-1</sup>. В переувлажненных еловых насаждениях величина опада составляет 3,03–3,73 т · га<sup>-1</sup>. Древостой дает от 79,9 до 95,5% от общей массы, растения напочвенного покрова – 3,2–10,4% в автоморфных условиях и 18,5–20,1% – в гидроморфных. В составе опада преобладает хвоя (56–62%) независимо от условий увлажнения, затем – стволов (21–25%). Из растений напочвенного покрова наибольший опад дают мхи (0,10–0,25 т · га<sup>-1</sup>), а в переувлажненных типах леса – 0,18–0,50 т · га<sup>-1</sup>. В зависимости от типа леса значительную массу опада могут давать травы, иногда лишайники (Казимиров, Морозова, 1973).

В лесных биогеоценозах происходит перемещение соединений азота из почвы в растение и обратно. С током воды минеральные азотные соединения выносятся растениями из почвы и потребляются на ростовые и метаболические процессы, а вместе с растительным опадом возвращаются в подстилку и затем в минеральные горизонты почвы. Наряду с этим, азот может поступать из атмосферы с осадками, в результате микробиологической азотфиксации и в то же время вымываться из живых органов растений, передвигаться по профилю почвы в более глубокие горизонты и выноситься с грунтовыми водами за пределы биогеоценозов.

Интенсивность перемещения азота в лесных насаждениях характеризуется значительными колебаниями и зависит от многих причин. В их числе большое значение имеет возраст насаждений. Несмотря на сравнительно одинаковый возраст сосновых насаждений, в зависимости от условий увлажнения (экологический ряд по увлажнению) количество азота в фитомассе варьирует в значительных пределах – от 126 до 312,6 кг · га<sup>-1</sup>. Эти различия определяются большой изменчивостью массы органического вещества в различных типах леса, неодинаковым видовым составом растений в фитоценозах и колебанием



содержания азота в одних и тех же видах растений, произрастающих на разных по плодородию почвах. Значительное количество азота, как уже указывалось, аккумулируется в лесной подстилке — от 304,3 до 650,7 кг · га<sup>-1</sup>. Количество азота в биогеоценозе в целом колеблется от 1426 до 8137 кг на 1 га, возрастая по мере увеличения увлажнения (табл. 45). Причем основные запасы азота накапливаются в почве (88–97%). В фитомассе количество его составляет от 3 до 12%. В более производительных насаждениях (в сосняках черничных и брусничных) доля почвенного азота несколько снижается и увеличиваются запасы азота в фитомассе, т. е. происходит более интенсивное использование насаждениями почвенного азота.

При формировании годичного прироста средневозрастные сосняки выносят из почвы довольно значительное количество азота. В автоморфных условиях вынос азота насаждениями на построение годичного прироста возрастает (от 17,9 до 53,7 кг · га<sup>-1</sup>) с увеличением уровня увлажненности почв от сосняка вересково-лишайникового до брусничного, черничного свежего и черничного влажного. С переходом к гидроморфным условиям (сосняки кустарничково-долгомошный и багульникового-сфагновый) вынос азота на построение органического вещества насаждением снижается до 42,3–45,1 кг · га<sup>-1</sup>. Таким образом, на построение годичного прироста наибольшее количество азота выносится из почвы более продуктивными сосняками брусничными и черничными.

Вынос азота с грунтовыми водами в общем балансе невелик и составляет доли процента от запасов минерального азота в 50-сантиметровом слое почв. Вероятно, малый вынос минерального азота объясняется тем, что основной минеральной формой азота является аммонийная. Аммоний, как известно, слабо вымывается из почв, так как обменно поглощается почвенными коллоидами. Нитратный азот, который легко вымывается, в исследованных почвах находится в незначительных количествах.

В сосняках ежегодно на 1 га возвращается в почву с растительным опадом 15–47 кг азота. Возврат азота составляет существенную величину по отношению к выносу его из почвы на формирование текущего прироста. В высокопроизводительных насаждениях этот показатель достигает 82–84, в низкопроизводительных — 87,5–90,8%. Эти данные свидетельствуют об интенсивном круговороте азота в системе фитоценоз — почва и о значительном пополнении запаса почвенного азота за счет растительного опада.

Растения извлекают из почвы на построение своего прироста минеральные соединения азота, а с опадом возвращаются органические. Если сравнить вынос элементов азотного питания из почвы сосновыми

Таблица 45

Динамика азота в средневозрастных сосновых биогеоценозах, кг · га<sup>-1</sup>

Тип леса	Запас азота						Вынос				Поступление			
	древостой	напочвенный покров	насаждение в целом	подстилка	почва (50 см)	биогеоценоз	на построение прироста			с грунтовыми водами	с опадом			с осадками
							древостой	напочвенный покров	насаждение		древостой	напочвенный покров	насаждение	
Сосняк вересково-лишайниковый	98,8	27,2	126,0	304,3	1300	1426,0	14,3	3,0	17,9	Не опр.	12,2	2,9	15,1	0,845
Сосняк брусничный	178,4	32,6	211,0	532,9	1700	1911,0	25,5	5,8	31,3	Не опр.	20,4	5,4	25,8	0,845
Сосняк черничный свежий	253,0	56,9	312,6	580,0	2200	2512,6	32,2	11,5	43,7	0,167	25,7	10,5	36,2	0,845
Сосняк черничный влажный	222,9	82,5	305,4	607,8	2600	2905,4	38,5	15,2	53,7	0,014	32,5	14,5	47,0	0,845
Сосняк кустарничково-долгомошный	166,9	90,1	257,2	650,7	3400	3657,0	28,3	16,8	45,1	0,125	23,9	15,8	39,7	0,845
Сосняк багульниково-сфагновый	141,2	96,1	237,2	612,9	7900	8137,0	24,1	18,2	42,3	0,332	20,8	17,6	38,4	0,845

насаждениями и запасы минерального азота в почвах, то ясно, что азотный режим в сосняках автоморфного ряда складывается довольно напряженно, в то время как в торфяных почвах отмечается накопление минерального азота.

На построение годичного прироста древостоем в сосняках брусничных выносятся 43%, в сосняках черничных — 47% и в сосняках багульниково-сфагновых — 14% запасов минерального азота в 50-сантиметровом слое почвы, а насаждениями в целом соответственно 52,6; 64,0; 24,8% (табл. 46).

Таблица 46

Соотношение годичного выноса азота средневозрастными сосняками на построение прироста и запаса минерального азота в корнеобитаемом слое почвы,  $\text{кг} \cdot \text{га}^{-1}$

Тип леса, почва	Запасы минерального азота в 50-см слое	Вынос азота из почвы		
		древостоем	напочвенной растительностью	всего
Сосняк брусничный, подзол иллювиально-железистый песчаный на флювиогляциальных отложениях	59,5	25,5	5,8	31,3
Сосняк черничный свежий, подзол иллювиально-гумусово-железистый песчаный на флювиогляциальных отложениях	68,2	32,2	11,5	43,7
Сосняк багульниково-сфагновый, торфяная переходная	170,9	24,1	18,2	42,3

Насаждениями средневозрастных ельников в течение года на построение прироста выносятся из почвы от 18 до 63  $\text{кг} \cdot \text{га}^{-1}$  азота. Причем, чем выше производительность насаждений, тем больше азота на прирост выносятся из почвы (Казимиров, Морозова, 1973).

В высокопродуктивных ельниках кисличных расход азота максимальный. Меньше всего расходует азота ельник лишайниково-каменистый, производительность древостоя которого самая низкая (табл. 47). Ряд потребления азота из почвы аналогичен ряду содержания его в фитомассе насаждения. В насаждениях, произрастающих на автоморфных почвах, основное количество азота потребляется древостоями, на долю почвенной растительности приходится 5—9% от общего потребления. В заболоченных ельниках, с хорошо развитым моховым и травяным покровом, повышается доля растений напочвенного покрова в потреблении почвенного азота.

Таблица 47

Динамика азота в средневозрастных еловых биогеоценозах,  $\text{кг} \cdot \text{га}^{-1}$ 

Тип леса	Запас азота						Вынос на прирост насаждения	Поступление с опадом
	древостой	напочвенный покров	насаждение в целом	подстилка	почва (25 см)	биогеоценоз		
Ельник лишайниково-каменистый	131,04	26,69	157,73	310,23	580	1205,69	18,07 2,51	13,87 2,16
Ельник долгомошный	169,98	46,63	216,61	633,0	3780	4846,22	29,69 8,58	23,71 7,96
Ельник болотно-травяной	231,46	49,0	280,46	1236,0	25100	26896,92	45,26 18,2	38,35 17,81
Ельник брусничный	210,08	21,29	231,37	230,76	1420	2113,5	30,80 3,97	23,92 3,37
Ельник черничный	324,40	19,96	344,36	263,64	1590	2542,36	40,95 4,67	31,57 4,22
Ельник чернично-кисличный	381,89	17,66	399,55	332,06	1630	2761,16	55,51 4,57	44,67 4,28
Ельник кисличный	476,07	14,37	490,44	351,98	3360	4692,86	63,40 3,83	50,51 3,49

*Примечание.* В числителе — насаждение, в знаменателе — напочвенный покров.

В древостое основное количество азота расходуется на построение фотосинтезирующего аппарата. Соотношение отдельных частей фитомассы по потреблению элементов питания на прирост характеризуется следующими величинами: хвоя — 79–80%; стволовая древесина — 10–11; корни — 4–5; ветви — 4–5%.

Использование азота растениями напочвенного покрова зависит в основном от их массы и видового состава. На прирост этих растений в ельнике лишайниково-каменистом расходуется  $2,5 \text{ кг} \cdot \text{га}^{-1}$ , а в ельнике болотно-травяном — 18,2. В течение года насаждение расходует большую часть минерального азота, содержащегося в слое почвы 0–25 см. По нашим данным, при содержании минерального азота в 25-сантиметровом слое почвы, равном  $78,3 \text{ кг}$  на  $1 \text{ га}$ , выносятся древостоем ельника кисличного  $59,6$ , растениями напочвенного покрова —  $3,8$ . Возврат азота в почву стоит в том же ряду, что и запасы азота в фитомассе насаждений.

Таким образом, для почв гидроморфного ряда интерес представляет разработка мер, усиливающих круговорот азота, в настоящее время недоступного растениям и входящего в состав так называемого негидролизующего азота.

Для автоморфных почв с небольшим запасом органического вещества необходимо увеличить содержание азота за счет внесения

минеральных удобрений. Эти мероприятия приведут к повышению плодородия лесных почв и в итоге — производительности насаждений.

### 7.2. Концептуально-балансовые модели круговорота азота в лесных биогеоценозах

Исследования составляющих внутреннего и внешнего цикла передвижения и превращения азота в лесных экосистемах проводили в среднетаежной подзоне на территории заповедника «Кивач» на стационарных пробных площадях, заложенных в высокопродуктивных сосняках черничных 165- и 50-летнего возраста, спонтанных и пройденных рубками ухода (40% изреживания древостоя), а также на сплошной вырубке. Почвы — подзолы иллювиально-железистые песчаные, сформировавшиеся на двучленных отложениях и имеющие в профиле прослойки утяжеленного механического состава. Аналогичные исследования проведены в ельнике разнотравном 130-летнего возраста, сформировавшемся на элювиально-поверхностно-глееватых глинистых почвах на ленточных глинах.

В северотаежной подзоне исследования проводились в заповеднике «Костомукшский» в сосняках черничных 110-летнего возраста, сформировавшихся на песчаных иллювиально-железистых подзолах на песчаной морене.

Проведенные исследования позволили разработать концептуально-балансовые модели круговорота азота в спонтанных и нарушенных экосистемах, которые позволяют проследить превращение азота в системе атмосфера — растение — почва за год.

#### Построение моделей

Предлагаемая концептуально-балансовая модель круговорота азота в таежных экосистемах состоит из шести блоков:

I блок — Растения ( $N_{БР}$ ) — запасы азота в надземной и подземной фитомассе насаждений.

II блок — Растительные остатки ( $N_{БО}$ ) — запасы азота в опаде и слое подстилки L.


III блок — Гумус ( $N_F$ ) — запасы азота в гумусе и слое почвы 0–25 см, включая F.

IV блок — Микроорганизмы ( $N_{БМ}$ ) — содержание белкового азота в биомассе микроорганизмов в слое почвы 0–25 см.

V блок — Фонд лабильного органического азота ( $N_L$ ) — запасы лабильного органического азота в слое почвы 0–25 см, включая F.

VI блок – Фонд минерального азота ( $N_M$ ). Запасы  $N-NH_4 + N-NO_3$  в слое почвы 0–25 см, включая F.

В модели используются следующие условные обозначения:

 – блоки,

$N_M$  и т. д. – форма азота в данном блоке,

 – процессы,



– азот, вступающий в процесс,

J – интенсивность процесса

кг/га – запасы азота в блоках, а для почвы – на ее определенный слой,

кг/га/год – интенсивность процессов. Для почвы то же, но на определенный слой,

$\Delta N$  – приращение запаса определенной формы азота в соответствующем блоке за определенный промежуток времени, в нашем случае за год.

Символы модели расшифровываются так:

$N-NH_3$  – азот аммонийный газообразный,

$N_M$  – азот минеральный ( $N-NH_4 + N-NO_3$ ),

$NH_4$  – аммонийный азот в почвенном растворе,

$NO_3$  – нитратный азот,

$N_L$  – азот лабильных органических соединений,

$N_B$  – азот белковый: БР – живых растений,

БО – растительных остатков,

БМ – микроорганизмов,

$N_T$  – азот устойчивых соединений гумусовой природы.

Процессы азотного цикла обозначаются в модели следующим образом:

$J_P$  – интенсивность потребления минерального азота из почвы растениями на построение годовичного прироста. Определяется экспериментально.

$J_{OP}$  – интенсивность перехода азота в блок азота белков растительных остатков. Определяется экспериментально. Другими словами, это запасы азота в годовом опаде насаждений.

$J_{ДБО}$  – деструкция белков растительных остатков. Определяется экспериментально.

$J_T$  – интенсивность закрепления азота в гумусе в процессе гумификации. Определяется расчетным путем.

$J_{ДГ}$  – интенсивность деструкции гумуса и высвобождение азота. Определяется экспериментально.



$J_{им}$  — интенсивность иммобилизации азота микроорганизмами (превращение в белок своего тела). Определяется расчетным путем через величину  $\Delta N_{БМ}$ .

$J_{ДБМ}$  — интенсивность деструкции белков микроорганизмов. Определяется расчетным путем через величину  $\Delta N_{БМ}$ .

$J_{АФ}$  — интенсивность ассоциативной азотфиксации. Определяется экспериментально.

$J_{АМ}$  — интенсивность аммонификации. Определяется экспериментально.

$J_{О}$  — привнос из атмосферы с осадками. Определяется экспериментально.

$J_{ПВ}$  — вынос азота почвенными водами. Определяется экспериментально.

$J_{ГА}$  — интенсивность выделения из почвы газообразного азота. Определяется экспериментально.

Для каждого блока разработана система балансовых уравнений:

$$I \text{ блок: } \Delta N_{БР} = J_{П} - J_{ОР} \quad (1)$$

$$II \text{ блок: } \Delta N_{БО} = J_{ОР} - J_{ДБО} \quad (2)$$

$$III \text{ блок: } \Delta N_{Г} = J_{Г} - J_{ДГ} \quad (3)$$

$$IV \text{ блок: } \Delta N_{БМ} = J_{им} - J_{ДБМ} \quad (4)$$

$$V \text{ блок: } \Delta N_{Л} = J_{ДБМ} + J_{ДБО} + J_{АФ} + J_{ДГ} - J_{Г} - J_{АМ} \quad (5)$$

$$VI \text{ блок: } \Delta N_{им} = J_{АМ} + J_{О} - J_{П} - J_{им} - J_{ПВ} - J_{ГА} \quad (6)$$

где  $\Delta N$  обозначает изменение запаса определенной формы азота в соответствующем блоке за определенный промежуток времени.

Рассмотрим количественные показатели каждого блока и интенсивности процессов, за счет которых происходит пополнение или обеднение каждого блока.

### I блок — растения ( $N_{БР}$ )

Данный блок складывается из запасов азота в надземной и подземной фитомассе насаждений.

Наибольшая часть азота в насаждениях сосредоточена в фитомассе древесного яруса (табл. 48). На его долю приходится 90% азота, аккумулируемого насаждениями. В древесном ярусе основная часть азота сосредоточена в древесине. В растениях напочвенного покрова накапливается лишь 3,5–4,1% азота всей фитомассы ненарушенных насаждений, в сосняке же, пройденном рубкой, — около 6,0%.

Сравнивая величины накопления азота 165- и 50-летнего сосняков, видим, что по мере увеличения возраста насаждений аккумуляция азота возрастает (549,5 кг · га<sup>-1</sup> — в 50-летнем и 880,7 — в 165-летнем сосняке). В сосняке 50 лет, пройденном рубкой, как и следовало ожидать, накопление азота в целом ниже, чем в естественном насаждении,

Таблица 48

Количество азота в различных частях фитомассы насаждений ( $N_{\text{БР}}$ ),  $\text{кг} \cdot \text{га}^{-1}$ 

Часть насаждения	Пробные площади			
	Сосняк чер- ничный 165 лет, I п. п.	Сосняк черничный 50 лет, 40% изре- живания, II п. п.	Сосняк чер- ничный 50 лет, III п. п.	Вырубка, V п. п.
Сосна (всего)	697,0	260,3	369,5	—
хвоя	72,9	45,9	67,5	—
кора	67,2	22,4	32,0	—
древесина	424,1	120,8	174,0	—
сучья	132,8	71,2	96,0	—
Ель (всего)	12,7	—	—	—
хвоя	4,2	—	—	—
кора	0,8	—	—	—
древесина	4,8	—	—	—
сучья	2,9	—	—	—
Береза (всего)	36,2	35,9	46,3	—
листья	7,0	4,6	7,0	—
кора	7,2	7,7	9,4	—
древесина	20,3	18,9	23,9	—
сучья	1,7	4,7	6,0	—
корни	94,1	106,5	104,7	105,0
Напочвенный покров	25,8	18,2	18,0	21,7
Надземная часть на- почвенного покрова	14,9	11,0	11,0	11,0
Насаждение	880,7	431,9	549,5	137,7

и составляет  $431,9 \text{ кг} \cdot \text{га}^{-1}$ . На концентрированной вырубке азот сосредоточен в фитомассе живого напочвенного покрова ( $32,7 \text{ кг} \cdot \text{га}^{-1}$ ).

При формировании годичного прироста сосновые насаждения выносят из почвы значительное количество элементов питания. Основная часть азота из почвы выносятся древостоем и составляет 71% от общего выноса, или  $32,2 \text{ кг} \cdot \text{га}^{-1}$ , в сосняке 165-летнего возраста, 82%, или  $43,4 \text{ кг} \cdot \text{га}^{-1}$ , в 50-летнем и 90%, или  $29,9 \text{ кг} \cdot \text{га}^{-1}$ , в 50-летнем разреженном насаждении. Наибольшее количество азота выносятся хвоей, однако после прореживания 50-летнего древостоя отмечается активный рост побегов сосны и связанное с ним потребление азота. Напочвенным покровом в 50-летних прореженном и ненарушенном насаждениях выносятся примерно равное количество азота ( $9,3$ – $9,6 \text{ кг} \cdot \text{га}^{-1}$ ), в 165-летнем сосняке этот показатель выше ( $12,2$ ), а на вырубке — самый высокий ( $13,5$ ) (табл. 49).

Возврат азота с опадом в почву составляет значительную величину — от 27 до  $40 \text{ кг}$  на 1 га (табл. 50). Этот процесс, по нашим данным, связан с опадом хвои и напочвенного покрова, отпад стволов нами не

учитывался. Учтено поступление в почву отпада корней, а в прореженном древостое — еще и поступление отмирающих корней оставшихся пней.

Имея экспериментальные данные, можно решить для данного блока ( $N_{БР}$ ) балансовое уравнение (1):

I п. п. (сосняк 165-летний):  $\Delta N_{БР} = 44,2 - 28,1 = 16,3 \text{ кг} \cdot \text{га}^{-1}$  в год;

II п. п. (сосняк 50-летний с 40%-м изреживанием):  $\Delta N_{БР} = 45,02 - 27,3 = 17,72 \text{ кг} \cdot \text{га}^{-1}$  в год;

III п. п. (сосняк 50 лет):  $\Delta N_{БР} = 53,0 - 40,5 = 12,5 \text{ кг} \cdot \text{га}^{-1}$  в год;

V п. п. (вырубка):  $\Delta N_{БР} = 13,5 - 12,8 = 0,7 \text{ кг} \cdot \text{га}^{-1}$  в год.

### II блок — растительные остатки ( $N_{БО}$ )

Запасы азота в блоке складываются из запасов азота в верхнем слое подстилки L, включая опад, и составляют в 160-летнем насаждении  $198,7 \text{ кг} \cdot \text{га}^{-1}$ , в 45-летнем —  $125,8$ , в 45-летнем изреженном —  $153,2$  и на вырубке —  $71,7 \text{ кг} \cdot \text{га}^{-1}$ .

Модельный опыт, проведенный на пробных площадях, позволил определить интенсивность деструкции белковых соединений растительных остатков слоя L, включая опад. Таким образом, показатель ЛДБО на пробных площадях

Таблица 49

Годичный вынос азота из почвы на формирование прироста ( $J_n$ )

Часть насаждения	Величина годовичного прироста, $\text{кг} \cdot \text{га}^{-1}$	Содержание азота, %	Вынос азота, $\text{кг} \cdot \text{га}^{-1}$
Сосняк 165 лет, I п. п.			
Сосна (всего)	—	—	23,35
хвоя	1100	1,35	14,85
побеги	500	0,80	4,0
древесина	2350	0,19	4,5
Береза	—	—	7,96
листья	300	2,32	7,0
побеги	130	0,43	0,56
древесина	120	0,18	0,22
корни	300	—	0,89
Напочвенный покров	—	—	12,2
Насаждение	—	—	44,4
Сосняк 50 лет, изреживание 40%, II п. п.			
Сосна (всего)	—	—	22,86
хвоя	850	1,35	11,5
побеги	820	0,80	6,56
древесина	2540	0,19	4,8
Береза	—	—	5,83
листья	200	2,32	4,64
побеги	100	0,43	0,43
древесина	420	0,18	0,76
корни	—	—	1,2
Напочвенный покров	—	—	9,3
Насаждение	—	—	45,02
Сосняк 50 лет, III п. п.			
Сосна (всего)	—	—	33,0
хвоя	1230	1,35	16,6
побеги	1150	0,80	9,2
древесина	3800	0,19	7,2
Береза	—	—	8,42
листья	300	2,32	7,0
побеги	130	0,43	0,56
древесина	420	0,18	0,86
корни	710	—	2,0
Напочвенный покров	—	—	9,6
Насаждение	—	—	53,02
Вырубка, V п. п.			
Напочвенный покров	—	—	13,5

Таблица 50

Возврат азота с растительным опадом ( $J_{OP}$ ),  $\text{кг} \cdot \text{га}^{-1}$  в год

Часть насаждения	Азот
Сосняк 165 лет, I п. п.	
Опад древостоя	
хвоя	10,7
кора	1,2
листья	1,9
сор	1,5
корни	1,15
Напочвенный покров	11,59
Насаждение в целом	28,10
Сосняк 50 лет, изреживание 40%, II п. п.	
Опад древостоя	
хвоя	9,3
кора	0,49
листья	6,50
сор	1,24
корни	1,03
Напочвенный покров	8,80
Насаждение в целом	27,33
Сосняк 50 лет, III п. п.	
Опад древостоя	
хвоя	15,9
кора	0,84
листья	8,10
сор	6,20
корни	0,39
Напочвенный покров	9,10
Насаждение в целом	40,49
Вырубка, V п. п.	
Напочвенный покров	12,80

следующий: I п. п. — 31,3; II п. п. — 10,8; III п. п. — 11,2; V п. п. — 14,7  $\text{кг} \cdot \text{га}^{-1}$  в год.

Изменение запасов азота в блоке рассчитываем по уравнению (2):

I п. п.:  $\Delta N_{BO} = 28,1 - 31,3 = -3,2$   $\text{кг} \cdot \text{га}^{-1}$  в год;

II п. п.:  $\Delta N_{BO} = 27,3 - 10,8 = 16,5$   $\text{кг} \cdot \text{га}^{-1}$  в год;

III п. п.:  $\Delta N_{BO} = 40,5 - 11,2 = 29,3$   $\text{кг} \cdot \text{га}^{-1}$  в год;

V п. п.:  $\Delta N_{BO} = 12,8 - 14,7 = -1,9$   $\text{кг} \cdot \text{га}^{-1}$  в год.

### III блок — гумус ( $N_f$ )

Заполнить данный блок удалось путем определения в горизонте F и слое почвы 0–25 см трудно- и негидролизуемого азота. В 165-летнем насаждении этот показатель составил 2382,9, в 50-летнем — 2033,4, в 50-летнем разреженном — 2308,5, на вырубке — 2230,8  $\text{кг} \cdot \text{га}^{-1}$ .

Определение изменения содержания азота в данном блоке представляет значительные трудности. Нами была предпринята попытка экспериментального изучения интенсивности деструкции гумуса и образования подвижных форм азота. Для этого закладывали образцы почвы, взятой из горизонтов F, A2 и Bf, в капроновых мешочках в эти же горизонты лесной почвы, определив фракционный состав азотных соединений в почве до закладки и через год. Установили, что показатель интенсивности

деструкции гумусовых веществ суммарно в слое F и 0–25 см составляет в сосняке 165 лет 62,6  $\text{кг} \cdot \text{га}^{-1}$  в год, в 50-летнем — 44,7, в 50-летнем разреженном — 21,2, а на вырубке — 13,5  $\text{кг} \cdot \text{га}^{-1}$  в год.

Экспериментальным путем получены данные динамики содержания азота гумусовых веществ (трудно- и негидролизуемые соединения) за 5 лет. Построив динамическую кривую, высчитали изменение

количества азота в гумусе. В почве 165-летнего соснового насаждения  $\Delta N_{\Gamma}$  составляет  $-0,546$ ; 50-летнего —  $+0,285$ ; 50-летнего разреженно-го —  $+0,673$ , а на вырубках —  $-0,963 \text{ кг} \cdot \text{га}^{-1}$  в год.

Из уравнения  $J_{\Gamma} = \Delta N_{\Gamma} - J_{\text{дг}}$  можно получить величину интенсивности накопления азота в гумусе: I п. п.  $J_{\Gamma} = 61,95$ ; II п. п.  $J_{\Gamma} = 21,87$ ; III п. п.  $J_{\Gamma} = 44,99$ ; V п. п.  $J_{\Gamma} = 12,54 \text{ кг} \cdot \text{га}^{-1}$  в год.

#### IV блок — микроорганизмы ( $N_{\text{БМ}}$ )

Запасы белкового азота микроорганизмов в горизонте F и минеральном слое почвы 0–25 см составили в 165-летнем сосняке 88,7, в 50-летнем — 88,66, в 50-летнем разреженном — 69,7, а на вырубке — 43,6  $\text{кг} \cdot \text{га}^{-1}$ . Изменение содержания азота в блоке за год рассчитывали по уравнению (4). По динамике запасов азота в блоке по годам можно судить о величине разности между интенсивностью иммобилизации азота телами микроорганизмов и деструкции их белка. Зная эту величину, пользуясь принципом минимальной оценки, можно принять, что

при  $\Delta N_{\text{БМ}} > 0$ ,  $J_{\text{дБМ}} = 0$ , а  $J_{\text{им}} = \Delta N_{\text{БМ}}$ ;

при  $\Delta N_{\text{БМ}} < 0$ ,  $J_{\text{им}} = 0$ , а  $J_{\text{дБМ}} = \Delta N_{\text{БМ}}$ ;

при  $\Delta N_{\text{БМ}} = 0$ ,  $J_{\text{им}} = J_{\text{дБМ}}$ .

Пользуясь данными динамике содержания в почве белкового азота микроорганизмов (табл. 51), по динамической кривой получили величину изменения запасов азота в блоке за год ( $\Delta N_{\text{БМ}}$ ), которая составила для 165-летнего насаждения 0, для 50-летнего — 0,1, для 50-летнего изреженного — 0,1, для вырубки — 0,1  $\text{кг} \cdot \text{га}^{-1}$  в год.

Таблица 51

Динамика белкового азота микроорганизмов в подзолах иллювиально-железистых песчаных на двучленных отложениях в слое 0–25 см (по неопубликованным данным Л. М. Загуральской)

Пробные площади	Микроорганизмы, тыс. $\text{г}^{-1}$			Биомасса, г сухого в-ва на га			Белковый азот, $\text{г} \cdot \text{га}^{-1}$		
	1986	1987	1988	1986	1987	1988	1986	1987	1988
Сосняк черничный 165 лет	10749	32230	20349	300,5	903,4	570	45,1	135,5	85,5
Сосняк черничный 50 лет	25847	34851	14710	903,4	612,0	257,4	135,5	91,8	38,6
Сосняк черничный 50 лет, изреживание 40%	12638	28123	23838	273,1	607,5	515,0	40,9	91,1	77,2
Вырубка, V п. п.	9632	16923	20214	179,8	316,1	377,6	26,9	47,4	56,6

Таким образом:

I п. п.:  $\Delta N_{\text{БМ}} = 0$ ,  $J_{\text{ИМ}} = J_{\text{ДБМ}}$ ;

II п. п.:  $\Delta N_{\text{БМ}} > 0$ ,  $J_{\text{ДБМ}} = 0$ , а  $J_{\text{ИМ}} = 0,1 \text{ кг} \cdot \text{га}^{-1}$  в год;

III п. п.:  $\Delta N_{\text{БМ}} > 0$ ,  $J_{\text{ДБМ}} = 0$ , а  $J_{\text{ИМ}} = 0,1 \text{ кг} \cdot \text{га}^{-1}$  в год;

V п. п.:  $\Delta N_{\text{БМ}} > 0$ ,  $J_{\text{ДБМ}} = 0$ , а  $J_{\text{ИМ}} = 0,1 \text{ кг} \cdot \text{га}^{-1}$  в год.

#### V блок — фонд лабильного органического азота ( $N_{\text{Л}}$ )

В качестве лабильного органического азота использовали данные содержания щелочногидролизуемого азота, определенного методом Корнфилда за вычетом аммонийного азота.

Запасы лабильного органического азота в слое подстилки F и минерального слоя 0–25 см составили в 165-летнем сосновом насаждении 100,2, в 50-летнем — 51,6, в 50-летнем разреженном — 60,8, на вырубке — 41,1  $\text{кг} \cdot \text{га}^{-1}$ .

Изменение содержания лабильного азота в блоке рассчитывается по уравнению (5):

I п. п.:  $\Delta N_{\text{Л}} = 31,3 + 3,2 + 62,6 - 61,95 - 28,4 = 6,75 \text{ кг} \cdot \text{га}^{-1}$  в год;

II п. п.:  $\Delta N_{\text{Л}} = 0 + 10,8 + 3,0 + 21,2 - 21,87 - 76,1 = -62,97 \text{ кг} \cdot \text{га}^{-1}$  в год;

III п. п.:  $\Delta N_{\text{Л}} = 0 + 11,2 + 3,9 + 44,7 - 44,99 - 43,9 = -29,09 \text{ кг} \cdot \text{га}^{-1}$  в год;

V п. п.:  $\Delta N_{\text{Л}} = 0 + 14,7 + 3,0 + 13,5 - 12,54 - 58,2 = -39,54 \text{ кг} \cdot \text{га}^{-1}$  в год.

#### VI блок — фонд минерального азота ( $N_{\text{М}}$ )

$N_{\text{М}} = N\text{-NH}_4 + N\text{-NO}_3$

Блок заполнялся путем определения запасов аммонийного и нитратного азота в горизонте подстилки F и минеральном слое почвы 0–25 см. В 165-летнем сосняке этот показатель составляет 32,9  $\text{кг} \cdot \text{га}^{-1}$ , в 50-летнем — 38,2, в 50-летнем, пройденном рубкой, — 40,3, на вырубке — 42,9  $\text{кг} \cdot \text{га}^{-1}$ .

Изменение содержания минерального азота почвы ( $\Delta N_{\text{М}}$ ) в блоке рассчитывается по уравнению (6). Для его расчета необходимы сведения о целом ряде составляющих азотного баланса: о поступлении минерального азота в экосистему с осадками, об интенсивности процесса аммонификации в почве, о потерях с внутрипочвенным стоком, об интенсивности выделения газообразного азота из почвы.

Проведенные исследования показали, что поступление азота с осадками в почву за год составляет 3,1–3,5  $\text{кг} \cdot \text{га}^{-1}$ , потери с внутрипочвенным стоком в лесу равны 0,01, на вырубке — 0,05  $\text{кг} \cdot \text{га}^{-1}$  в год. Величина интенсивности выделения газообразного азота, в нашем случае аммиака, из почвы в лесу равна в среднем 0,01, на вырубке — 0,02  $\text{кг} \cdot \text{га}^{-1}$  в год.



Аммонификационную способность почв определяли в лабораторном опыте. За два месяца компостирования почвы при оптимальных условиях температуры и влажности накопление аммония в образцах было максимальным. Исходя из предположения, что близкие к оптимальным условия температуры и влажности в почве могут складываться на протяжении трех месяцев в период вегетации растений, а в другие месяцы интенсивность аммонификации значительно ниже, сочли возможным прибавку аммония в почвенных образцах за три месяца считать годичной.

В результате этого допущения были получены величины интенсивности аммонификации для почв исследуемых сосняков: в 165-летнем — 28,4, в 50-летнем — 43,9, в 50-летнем изреженном — 76,1, на вырубке — 58,2 кг · га<sup>-1</sup> в год. Таким образом, величины изменения в течение года запасов минерального азота в блоке следующие:

I п. п.:  $\Delta N_M = 28,4 + 3,1 - 44,4 - 0,1 - 0,01 - 0,01 = 12,92 \text{ кг} \cdot \text{га}^{-1}$  в год;

II п. п.:  $\Delta N_M = 76,1 + 3,4 - 45,0 - 0,1 - 0,01 - 0,01 = 34,4 \text{ кг} \cdot \text{га}^{-1}$  в год;

III п. п.:  $\Delta N_M = 43,9 + 3,5 - 53,02 - 0,1 - 0,01 - 0,01 = -5,74 \text{ кг} \cdot \text{га}^{-1}$  в год;

V п. п.:  $\Delta N_M = 58,2 + 3,3 - 13,5 - 0,1 - 0,05 - 0,02 = 47,83 \text{ кг} \cdot \text{га}^{-1}$  в год.

Таким образом, составлены в первом приближении концептуально-балансовые модели круговорота азота в спонтанных 165-летнем (рис. 32) и 50-летнем (рис. 33) сосновых насаждениях, в 50-летнем, пройденном выборочной рубкой (рис. 34) и для вырубки (рис. 35) в среднетаежной подзоне Карелии.

Построение концептуально-балансовой модели круговорота азота в сосняке черничном 110-летнего возраста в северотаежной подзоне осуществлялось аналогичным образом. Большая часть данных получена экспериментальным путем. Почвы, на которых сформировался исследуемый сосняк, — песчаные иллювиально-железистые подзолы на песчаной морене.

Запасы азота в фитомассе исследуемого сосняка черничного 110 лет составляют 317 кг · га<sup>-1</sup>. Экспериментально определено, что интенсивность потребления из почвы ( $J_{\text{П}}$ ) и поступление азота ( $J_{\text{ОР}}$ ) в блок  $N_{\text{БО}}$  составляет соответственно 24 и 11 кг · га<sup>-1</sup> в год. Отсюда  $\Delta N_{\text{БР}} = 24 - 11 = 13 \text{ кг} \cdot \text{га}^{-1}$  в год.

Запасы азота в растительных остатках ( $N_{\text{БО}}$ ) составляют 193 кг · га<sup>-1</sup>. Экспериментально установлена величина  $J_{\text{ДБО}} = 9,65 \text{ кг} \cdot \text{га}^{-1}$  в год. Изменения в блоке содержания белков растительных остатков рассчитываются следующим образом:  $\Delta N_{\text{БО}} = 11 - 9,65 = 1,35 \text{ кг} \cdot \text{га}^{-1}$  в год.

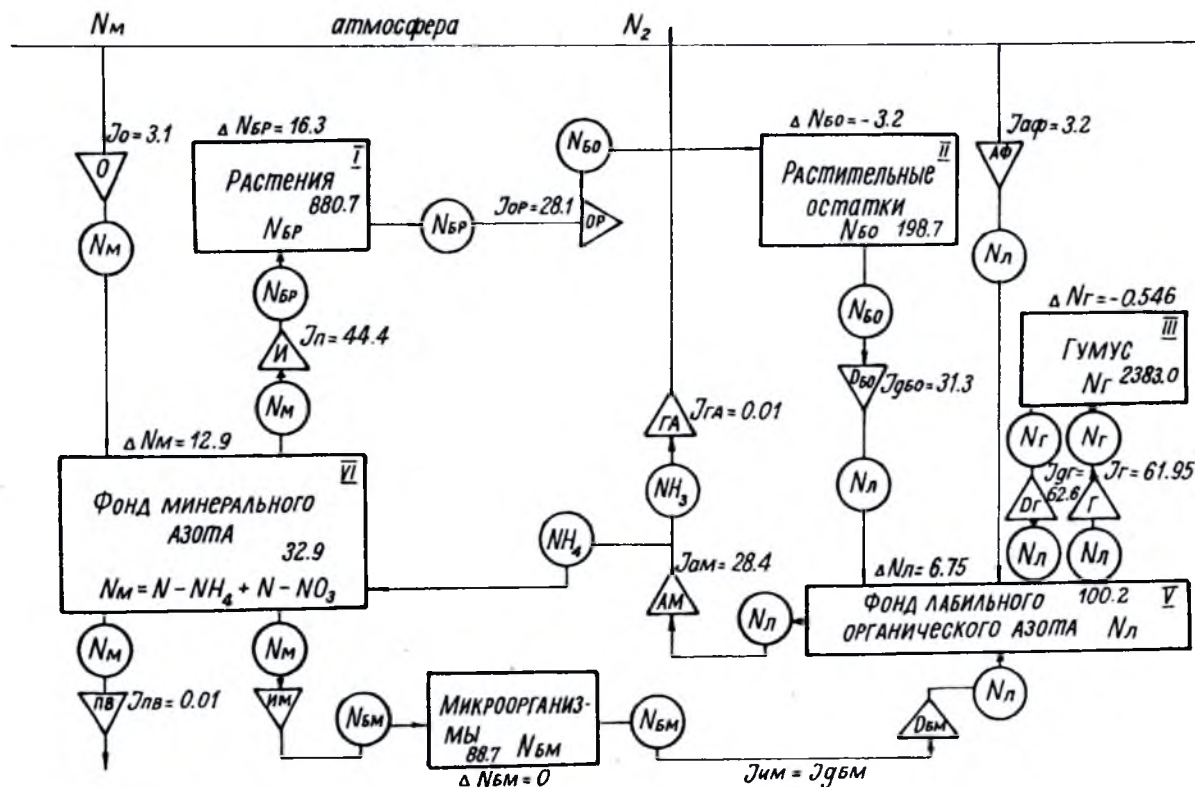


Рис. 32. Концептуально-балансовая модель круговорота азота в 165-летнем сосняке черничном среднетаежной подзоны (здесь и далее:  $\Delta N$ ,  $J$  — кг/га в год,  $N$  — кг/га)

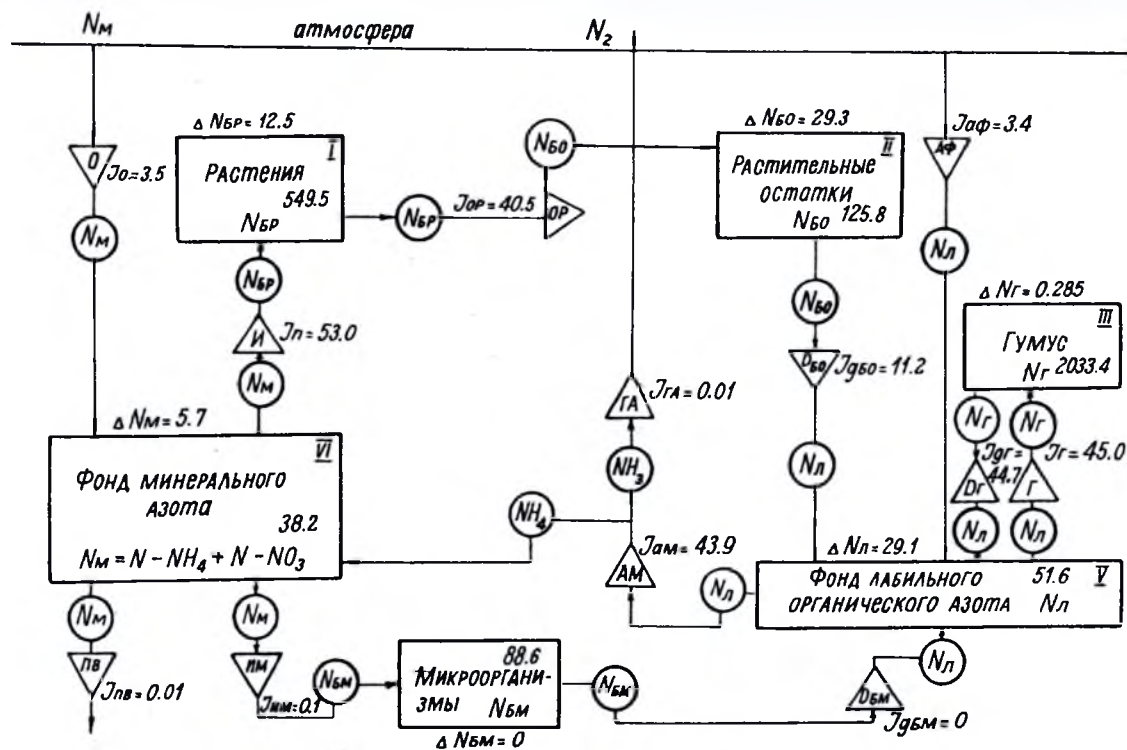


Рис. 33. Концептуально-балансовая модель круговорота азота в 50-летнем сосняке черничном среднетаежной подзоны

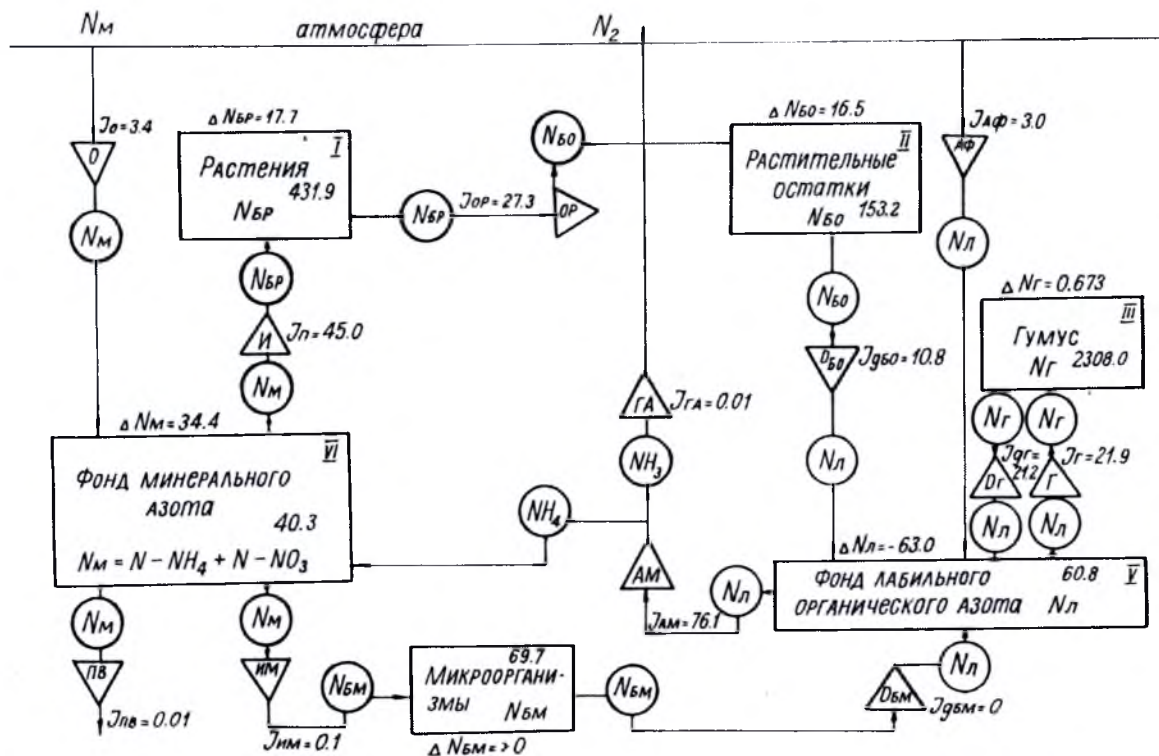


Рис. 34. Концептуально-балансовая модель круговорота азота в 50-летнем сосняке черничном с 40%-м изреживанием древостоя, среднетаежная подзона

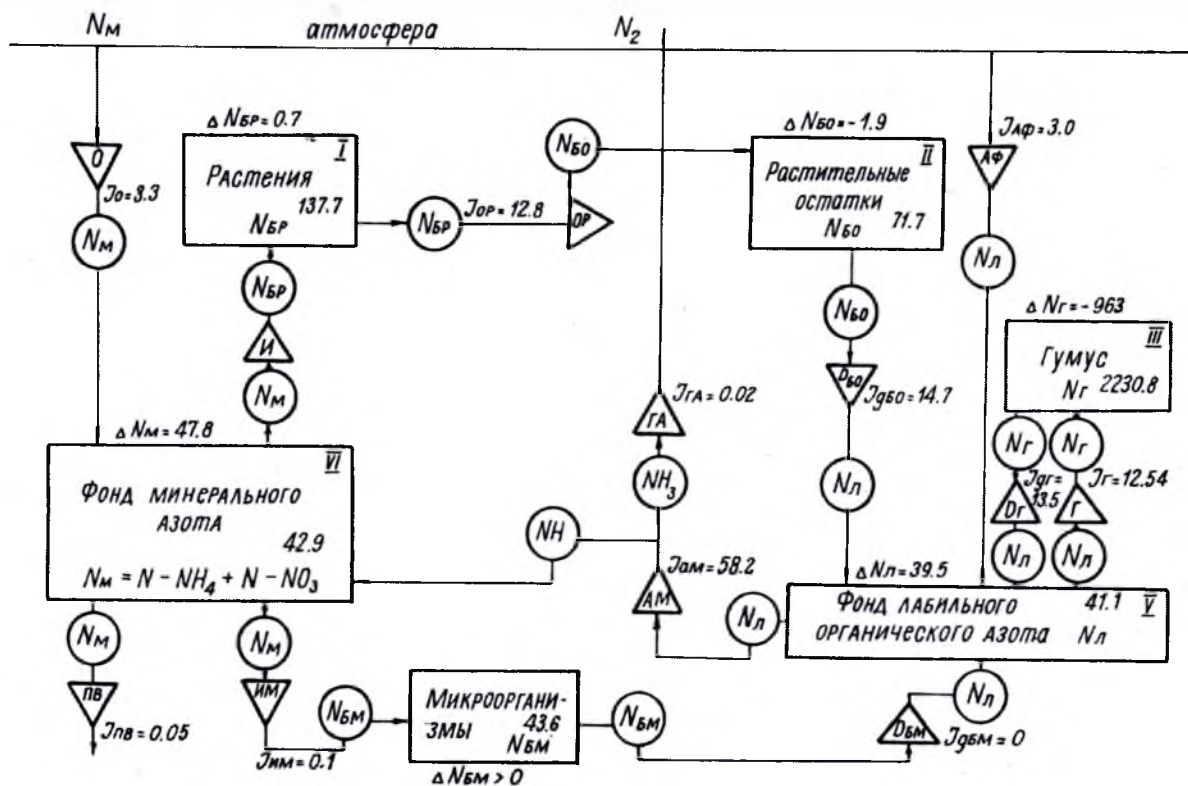


Рис. 35. Концептуально-балансовая модель круговорота азота на вырубке, среднетаежная подзона

Установили, что запасы азота гумусовых веществ в горизонте подстилки F и минеральном слое почвы мощностью до 25 см ( $N_F$ ) равны  $2638 \text{ кг} \cdot \text{га}^{-1}$ . Результаты модельного опыта по определению интенсивности деструкции азота гумуса ( $J_{ДГ}$ ) показали, что эта величина составляет  $39,1 \text{ кг} \cdot \text{га}^{-1}$  в год. Изменение запасов азота в гумусе почв ( $\Delta N_F$ ) за год в горизонте F и слое 0–25 см составляют  $-0,50 \text{ кг} \cdot \text{га}^{-1}$ . По уравнению получаем показатель интенсивности гумификации:  $J_F = J_{ДГ} + \Delta N_F = 39,1 - 0,50 = 38,6 \text{ кг} \cdot \text{га}^{-1}$  в год. Запасы белкового азота микроорганизмов в слое почвы 0–25 см ( $N_{БМ}$ )  $4,4 \text{ кг} \cdot \text{га}^{-1}$ . При  $\Delta N_{БМ} = 0$   $J_{ИМ} = J_{ДБМ}$ .

Определив запасы щелочногидролизуемого азота в слое F и 25 см и вычтя запасы аммонийного азота в этом же слое, получим запасы лабильного органического азота:  $N_L = 71,8 \text{ кг} \cdot \text{га}^{-1}$ .

Расчет интенсивности изменения запасов лабильного азота в блоке:

$$J_{ДБМ} = J_{ИМ};$$

$$J_{АФ} = 0,5 \text{ кг} \cdot \text{га}^{-1} \text{ в год};$$

$$J_{ДБО} = 9,7 \text{ кг} \cdot \text{га}^{-1} \text{ в год};$$

$$J_{ДГ} = 39,1 \text{ кг} \cdot \text{га}^{-1} \text{ в год};$$

$$J_{АМ} = 9,5 \text{ кг} \cdot \text{га}^{-1} \text{ в год};$$

$$\Delta N_L = 9,7 + 0,5 + 39,1 - 38,6 - 9,5 = 1,2 \text{ кг} \cdot \text{га}^{-1} \text{ в год}.$$

Определенные нами запасы минерального азота в этом же слое почвы ( $N_M$ ) составили  $20,1 \text{ кг} \cdot \text{га}^{-1}$ .

Изменение запасов минерального азота в блоке ( $\Delta N_M$ ) рассчитали следующим образом:

$$J_{АМ} = 9,5 \text{ кг} \cdot \text{га}^{-1} \text{ в год};$$

$$J_O = 2,1 \text{ кг} \cdot \text{га}^{-1} \text{ в год};$$

$$J_{ПВ} = 0,20 \text{ кг} \cdot \text{га}^{-1} \text{ в год};$$

$$J_{ИМ} = 0;$$

$$J_{П} = 24,0 \text{ кг} \cdot \text{га}^{-1} \text{ в год};$$

$$J_{ГА} = 0.$$

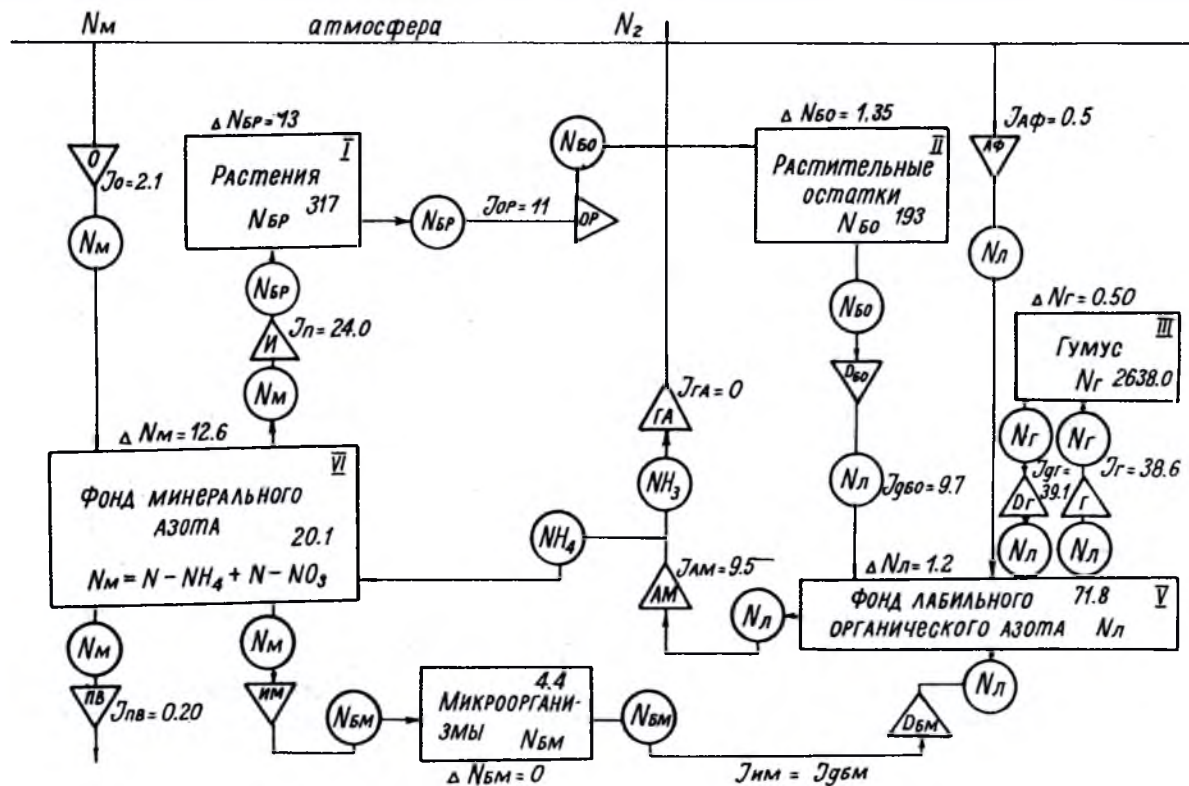
$$\Delta N_M = 9,5 + 2,1 - 24,0 - 0,20 = -12,6 \text{ кг} \cdot \text{га}^{-1} \text{ в год}.$$

Построенная концептуально-балансовая модель круговорота азота в 110-летнем сосняке черничном северотаежной подзоны приводится на рис. 36.

По аналогичной методике построена концептуально-балансовая модель круговорота азота в 130-летнем ельнике разнотравном, сформировавшемся на элювиально-поверхностно-глееватых глинистых почвах на ленточных глинах в среднетаежной подзоне (рис. 37).

Запасы фитомассы исследуемого ельника составляют  $624 \text{ кг} \cdot \text{га}^{-1}$ . Экспериментально определено, что интенсивность потребления из почвы ( $J_{П}$ ) и поступление азота ( $J_{ОР}$ ) в блок  $N_{БО}$  составляет соответственно  $32,0$  и  $31,0 \text{ кг} \cdot \text{га}^{-1}$  в год. Отсюда  $\Delta N_{БР} = 32 - 31 = 1 \text{ кг} \cdot \text{га}^{-1}$  в год.





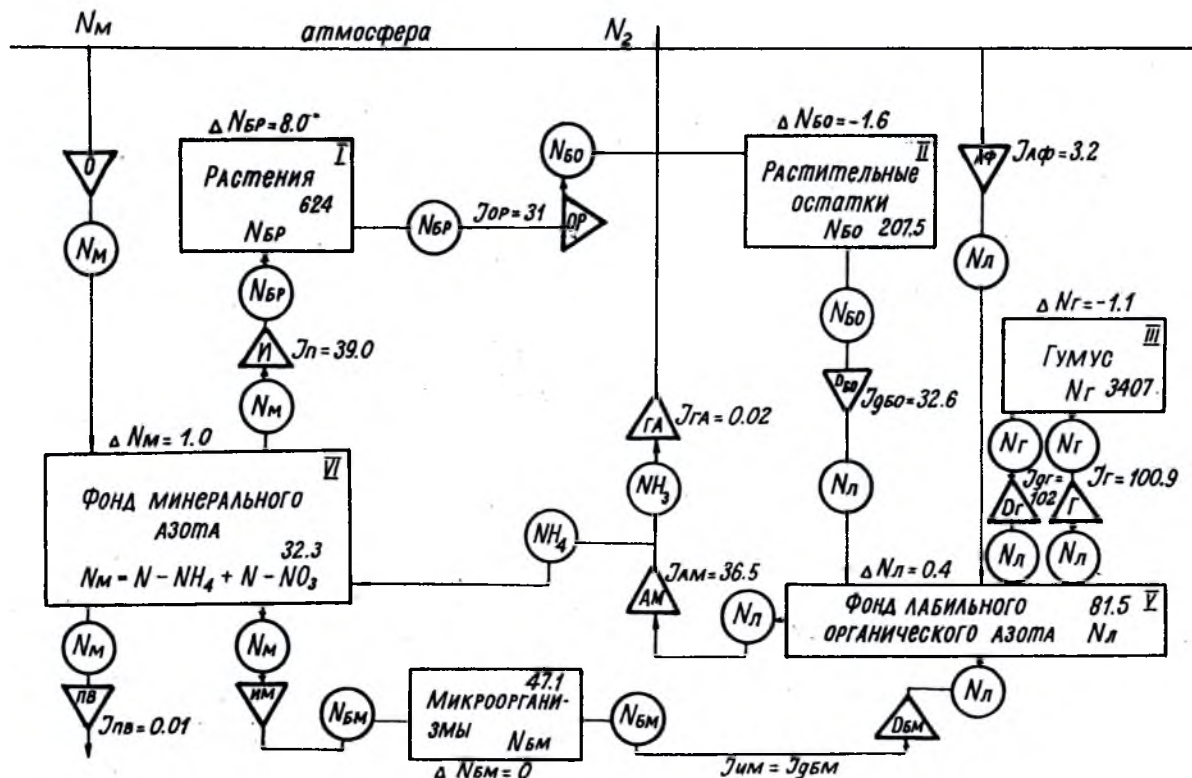


Рис. 37. Концептуально-балансовая модель круговорота азота в 130-летнем ельнике разнотравном средне-таежной подзоны

Запасы азота в растительных остатках ( $N_{BO}$ ) составляют  $207,5 \text{ кг} \cdot \text{га}^{-1}$ . Экспериментально установлена величина  $J_{ДБО} = 32,6 \text{ кг} \cdot \text{га}^{-1}$  в год.

Изменения в блоке содержания белков растительных остатков рассчитываются следующим образом:  $\Delta N_{BO} = 31 - 32,6 = -1,6 \text{ кг} \cdot \text{га}^{-1}$  в год.

Установили, что запасы азота гумусовых веществ в горизонте подстилки F и минеральном слое почвы мощностью до 25 см ( $N_{\Gamma}$ ) равны  $3407 \text{ кг} \cdot \text{га}^{-1}$ . Результаты модельного опыта по определению интенсивности деструкции азота гумуса ( $J_{ДГ}$ ) показали, что эта величина составляет  $102,0 \text{ кг} \cdot \text{га}^{-1}$  в год. Изменение запасов азота в гумусе почвы ( $\Delta N_{\Gamma}$ ) за год составляет  $-1,1 \text{ кг} \cdot \text{га}^{-1}$ . По уравнению получаем показатель интенсивности гумификации:  $J_{\Gamma} = J_{ДГ} + \Delta N_{\Gamma} = 102 - 1,1 = 100,9 \text{ кг} \cdot \text{га}^{-1}$  в год. Запасы белкового азота микроорганизмов в слое почвы до 25 см ( $N_{БМ}$ ) =  $47,1 \text{ кг} \cdot \text{га}^{-1}$ . При  $\Delta N_{БМ} = 0$   $J_{им} = J_{ДБМ}$ .

Определив запасы щелочногидролизуемого азота в слое почвы F и до 25 см минеральной толщи и вычтя запасы аммонийного азота в этом же слое, получили запасы лабильного органического азота:  $N_{л} = 81,5 \text{ кг} \cdot \text{га}^{-1}$ .

Расчет интенсивности изменения запасов лабильного азота в блоке:

$$J_{ДБМ} = J_{им};$$

$$J_{АФ} = 3,2 \text{ кг} \cdot \text{га}^{-1} \text{ в год};$$

$$J_{ДБО} = 32,6 \text{ кг} \cdot \text{га}^{-1} \text{ в год};$$

$$J_{ДГ} = 102 \text{ кг} \cdot \text{га}^{-1} \text{ в год};$$

$$J_{АМ} = 36,5 \text{ кг} \cdot \text{га}^{-1} \text{ в год};$$

$$\Delta N_{л} = 32,6 + 3,2 + 102 - 100,9 - 36,6 = 0,4 \text{ кг} \cdot \text{га}^{-1} \text{ в год}.$$

Определенные нами запасы минерального азота в том же слое почвы ( $N_{м}$ ) составили  $32,3 \text{ кг} \cdot \text{га}^{-1}$ . Изменение запасов минерального азота в блоке ( $\Delta N_{м}$ ) рассчитали следующим образом:

$$J_{АМ} = 36,5 \text{ кг} \cdot \text{га}^{-1} \text{ в год};$$

$$J_{О} = 3,5 \text{ кг} \cdot \text{га}^{-1} \text{ в год};$$

$$J_{ПВ} = 0,01 \text{ кг} \cdot \text{га}^{-1} \text{ в год};$$

$$J_{им} = 0;$$

$$J_{П} = 32,0 \text{ кг} \cdot \text{га}^{-1} \text{ в год};$$

$$J_{ГА} = 0,02 \text{ кг} \cdot \text{га}^{-1} \text{ в год};$$

$$\Delta N_{м} = 36,5 + 3,5 - 39,0 - 0,01 = 1,0 \text{ кг} \cdot \text{га}^{-1} \text{ в год}.$$

### Анализ моделей

Постоянное перемещение азотсодержащих соединений происходит как внутри лесных экосистем, так и за их пределами. Внутренний цикл азота состоит из поглощения азота почвы растениями

и использования его на ростовые и метаболические процессы и возвращения в почву в виде опада и отпада. Внешний азотный цикл — это процессы поступления азота в экосистему из атмосферы в результате микробиологической азотфиксации и с осадками. Во внешний цикл входят и процессы выделения газообразного азота из почвы, а также потери его с почвенными водами.

Концептуально-балансовая модель круговорота азота в экосистеме с высокопроизводительным сосновым древостоем 165-летнего возраста в среднетаежной подзоне позволила установить, что 165-летний сосняк ежегодно потребляет весь образующийся в экосистеме минеральный азот. Изменение запасов его за год выражается отрицательной величиной ( $-12,9 \text{ кг} \cdot \text{га}^{-1}$ ), что свидетельствует о существовании неучтенных нами статей поступления азота в блок (деструкция белка микроорганизмов, животных, азот отпада стволов, деятельность грибов) и о напряженном режиме азотного питания насаждения. Закрепление азота в растительном блоке составляет 36,7% от потребления, т. е.  $16,3 \text{ кг}$  в год, 63,3% — возвращается с опадом.

Деструкция белкового азота растительных остатков (опада), по нашим данным, происходит довольно интенсивно. Деструкция гумусовых азотсодержащих веществ в почве почти уравнивается процессом иммобилизации этих соединений. Отмечено накопление азота в составе лабильных органических соединений почвы. Несмотря на значительную эффективность процесса аммонификации, расход азота этих соединений компенсируется за счет разложения органических остатков.

Процессы иммобилизации и деструкции белка микроорганизмов в данной экосистеме уравниваются.

Таким образом, проведенные исследования и анализ модели позволили выявить ряд показателей, характеризующих структуру, особенности функционирования экосистемы и степень замкнутости круговорота азота. Так, для структуры соснового леса 165-летнего возраста характерно преобладание азота, входящего в мертвое органическое вещество, над живым. При этом он представлен, в основном, в виде азота гумуса. В живом органическом веществе доминирует азот растений (азот, входящий в состав животных организмов и грибов, не учитывался). Для структуры фитомассы характерно преобладание азота в надземных органах древостоя.

Функционирование экосистемы может быть охарактеризовано достаточно высокими величинами первичной продукции, содержащей  $16,3 \text{ кг} \cdot \text{га}^{-1}$  азота. Оценка степени замкнутости круговорота азота в экосистеме (или открытости экосистемы) базируется на определении интенсивности выхода азота из экосистемы и интенсивности

потребления азота растениями и составляет  $\sim 0,001$ . Это свидетельствует о высокой степени замкнутости биологического круговорота азота в системе. Суммируя все показатели изменчивости запасов азота в блоках, получили положительный баланс азота в системе:

$$\Sigma \Delta N = 16,3 - 12,9 - 3,2 + 6,75 - 0,546;$$

$$\Sigma \Delta N = 6,4 \text{ кг} \cdot \text{га}^{-1} \text{ в год.}$$

Извне в систему поступает  $6,3 \text{ кг} \cdot \text{га}^{-1}$ , а уходит  $0,02 \text{ кг} \cdot \text{га}^{-1}$  азота в год. Следовательно, система накапливает азот как во внутреннем цикле, так и за счет внешних поступлений.

Средневозрастной сосняк ежегодно потребляет весь поступающий в почву минеральный азот. Изменение запасов его в почве в год выражается отрицательной величиной ( $-5,7$ ), что свидетельствует, как и в предыдущем случае, о напряженном режиме минерального азотного питания насаждений. Закрепление азота в растительности составляет 23,6% от потребления, т. е.  $12,5 \text{ кг}$  азота в год, что ниже, чем в 165-летнем сосняке, 76,4% азота возвращается в почву с опадом.

Деструкция растительных остатков протекает достаточно интенсивно, однако за год не наблюдается полного разложения белка опада и перехода его азота в другие компоненты экосистемы. Процессы гумификации и деструкции гумуса уравниваются с незначительным преобладанием процесса гумификации. Активно протекающая аммонификация приводит к обеднению азотом фонда лабильного органического вещества почвы. Интенсивность процесса иммобилизации азота телами микроорганизмов выше, чем деструкция. Для структуры 50-летнего соснового насаждения также характерно преобладание азота, входящего в мертвое органическое вещество, над живым. При этом он представлен, в основном, в виде азота гумуса. В живом органическом веществе доминирует азот растений. Для структуры фитомассы характерно преобладание надземных органов древостоя. Первичная продукция насаждения характеризуется значительным запасом азота ( $12,5 \text{ кг} \cdot \text{га}^{-1}$ ). Степень замкнутости круговорота высокая и составляет 0,0004. В целом баланс азота в экосистеме 50-летнего сосняка складывается положительно:

$$\Sigma \Delta N = 12,5 + 29,3 - 5,7 - 29,1 + 0,285;$$

$$\Sigma \Delta N = 7,3 \text{ кг} \cdot \text{га}^{-1} \text{ в год.}$$

Система накапливает азот, перераспределяя его между блоками: за счет обеднения почвенных блоков и накопления азота в фитомассе (живой и мертвой). Извне поступает  $6,9 \text{ кг} \cdot \text{га}^{-1}$  в год, уходит  $0,02 \text{ кг} \cdot \text{га}^{-1}$  в год.

Анализируя концептуально-балансовую модель круговорота азота в биогеоценозе с 50-летним изреженным древостоем, видим, что для него, как и для ненарушенного соснового насаждения этого же

возраста, характерно преобладание азота мертвого органического вещества над живым, азота гумуса. В структуре фитомассы преобладают надземные органы древостоя, и в живом органическом веществе доминирует азот растений. Первичная продукция характеризуется значительным запасом азота, большим, чем в ненарушенных насаждениях ( $17,7 \text{ кг} \cdot \text{га}^{-1}$ ). Степень замкнутости круговорота остается высокой —  $0,0004$ .

Отличия в характере функционирования экосистемы, возникшие после рубки, довольно заметны. Несмотря на то что интенсивность поглощения азота растениями несколько ниже, чем в ненарушенном одновозрастном сосняке, закрепление его в течение года древостоем довольно значительное и составляет  $39,3\%$ , в опад переходит  $60,7\%$  азота.

Разложение растительных остатков протекает интенсивно, в этом блоке ( $N_{BO}$ ) азотный баланс складывается положительно. Положителен баланс азота и в блоке гумуса. Здесь процесс гумификации преобладает над процессом деструкции гумусовых азотсодержащих соединений. Следует отметить значительное обеднение почвы лабильным органическим азотом. Выборочная рубка способствует усилению процессов минерализации органического азота, в нашем случае — аммонификации. За счет снижения запасов лабильного органического азота происходит накопление минеральных азотсодержащих соединений в почве.

Внутренний баланс азота в системе положительный:

$$\Sigma \Delta N = 17,7 + 16,5 + 34,4 - 63,0;$$

$$\Sigma \Delta N = 6,3 \text{ кг} \cdot \text{га}^{-1} \text{ в год.}$$

В целом система накапливает азот, однако происходит перераспределение его запасов между блоками и обеднение почвы лабильным органическим азотом. Извне в систему поступает  $6,4 \text{ кг}$  азота на гектар в год, а уходит за ее пределы  $0,02 \text{ кг} \cdot \text{га}^{-1}$  в год.

Исследуя концептуально-балансовую модель круговорота азота в припевающем сосновом насаждении северотаежной подзоны, установили, что за год сосняк потребляет весь образующийся в почве минеральный азот. Изменение его содержания в блоке за год составляет отрицательную величину ( $-12,6 \text{ кг} \cdot \text{га}^{-1}$  в год), что свидетельствует о крайне напряженном режиме азотного питания и о неучтенных статьях поступления азота в блок  $N_M$ . Аналогичная тенденция выявлена нами в высокопродуктивном сосняке в среднетаежной подзоне. Закрепление азота в растительном блоке составляет  $54,3\%$  от потребления,  $45,7\%$  возвращается с опадом.

Деструкция белкового азота растительных остатков протекает менее интенсивно, чем в среднетаежной подзоне. Деструкция гумусовых



азотсодержащих соединений в почве почти уравнивается процессами иммобилизации этих соединений. Фонд лабильного органического азота ежегодно пополняется, но в незначительной степени и менее интенсивно, чем в среднетаежной подзоне. Процесс аммонификации в почве выражен слабее, чем в сосняках средней тайги. Процессы иммобилизации и деструкции белка микроорганизмов в данной экосистеме уравновешены. В целом запасы белкового азота микроорганизмов в почве сосняков в среднетаежной подзоне во много раз выше, чем в северной тайге.

Для структуры соснового леса 110-летнего возраста в северотаежной подзоне характерно существенное преобладание азота, входящего в мортмассу, над азотом живого вещества — в 9 раз, в то время как в средней тайге — в 2,5 раза.

Функционирование экосистемы может быть охарактеризовано достаточно высокими величинами первичной продукции, содержащей  $13,0 \text{ кг} \cdot \text{га}^{-1}$  азота. Степень замкнутости круговорота азота в экосистеме высокая и характеризуется показателем 0,008.

Суммируя все показатели изменчивости запасов азота в блоках, получили положительный баланс азота в системе:

$$\Sigma \Delta N = 13,0 + 1,35 - 0,5 + 1,2 - 12,6;$$

$$\Sigma \Delta N = 2,45 \text{ кг} \cdot \text{га}^{-1} \text{ в год.}$$

Емкость биологического круговорота азота в сосняках черничных северной тайги ниже, чем в среднетаежной подзоне.

Анализ модели биологического круговорота азота в ельнике разнотравном 130 лет в среднетаежной подзоне свидетельствует о напряженном режиме азотного питания насаждения. За год растениями потребляется практически весь азот, накапливающийся в почве, однако показатель изменчивости запасов минерального азота в блоке  $N_M$  выражается положительной величиной. Закрепление азота в растительном блоке составляет всего лишь 20,5%, а 79,5% — возвращается с опадом.

Деструкция белкового азота растительных остатков протекает интенсивно ( $\Delta N_{BO}$ ). Процессы гумификации и деструкции гумуса уравнивают друг друга. Фонд лабильного азота из года в год практически не меняется. Запасы азота белковых тел микроорганизмов в почве в 2 раза ниже, чем в сосняках. Для исследуемого насаждения также характерно преобладание азота в мортмассе по сравнению с живым веществом (в 5 раз).

Функционирование экосистемы может быть охарактеризовано величинами первичной продукции, содержащей  $8 \text{ кг} \cdot \text{га}^{-1}$  азота.

Степень замкнутости круговорота азота в экосистеме высокая и характеризуется показателем 0,001. Система накапливает азот во

внутреннем и внешнем циклах. Поступление азота извне в систему составляет  $6,7 \text{ кг} \cdot \text{га}^{-1}$  в год, а потери за счет вымывания и газообразные потери — всего  $0,03 \text{ кг} \cdot \text{га}^{-1}$  в год.

Суммируя все показатели изменчивости запасов азота в блоках, получили положительный баланс азота в системе:

$$\Sigma \Delta N = 8,0 + 1,0 - 1,6 - 1,1 + 0,4;$$

$$\Sigma \Delta N = 6,3 \text{ кг} \cdot \text{га}^{-1} \text{ в год.}$$

Анализ концептуально-балансовой модели круговорота азота на сплошной пятилетней вырубке показал, что в результате рубки общий запас фитомассы в ценозе уменьшился в 5 раз. Установлено, что оставшийся растительный напочвенный покров и молодой подрост сосны и березы поглощает 22% образующегося минерального азота. Закрепление азота в растительном блоке составляет всего лишь 5% от потребления из почвы, остальные 95% возвращаются в почву с травянистым и моховым опадом. Растительные остатки в течение года, по нашим данным, разлагаются интенсивно. Блок гумуса стабилен, наблюдается лишь тенденция усиления процесса деструкции гумуса по сравнению с гумификацией. Активно протекает аммонификация лабильного органического азота, за счет чего накапливается в почве минеральный азот. Так же как для лесных экосистем, для вырубки характерно преобладание в общем запасе азота мертвого органического вещества и, в основном, азота гумуса.

В структуре фитомассы преобладают корни древесных растений, оставшихся в почве, в живой фитомассе — растения напочвенного покрова. Судьба корней древесных растений после рубки древостоя требует дальнейшего изучения, что может внести некоторые коррективы в наши представления о распределении азота в системе. Функционирование системы характеризуется накоплением азота в растительном блоке и блоке минерального азота. Степень замкнутости системы остается довольно высокой и составляет 0,005, т. е. намного ниже единицы. Суммируя все доступные нам показатели изменчивости количества азота в блоках, получили положительный баланс азота в системе:

$$\Sigma \Delta N = 0,7 + 47,8 - 1,9 - 39,5;$$

$$\Sigma \Delta N = 6,1 \text{ кг} \cdot \text{га}^{-1}.$$

Система накапливает азот во внутреннем и внешнем циклах. Поступление азота извне в систему составляет  $6,3 \text{ кг}$  азота на  $1 \text{ га}$  в год, а потери за счет вымывания и газообразного выделения из почвы —  $0,07 \text{ кг} \cdot \text{га}^{-1}$  в год.

Таким образом, концептуально-балансовые модели позволяют систематизировать наши знания о процессах превращения азотсодержащих соединений в биогеоценозах, путях их передвижения и количественных показателях накопления.

### 7.3. Статистические модели продуктивности лесных почв

Рост — это новообразование органов и тканей, а интенсивность его определяется, прежде всего, обеспеченностью растений азотом. Изменяя режим азотного питания, можно направленно влиять на обмен веществ, рост и развитие растений. Известно, что сосна обладает достаточно хорошей морфолого-физиологической адаптацией к разнообразным условиям минерального питания. Сосна способна расти на почвах с очень низким плодородием, в то время как для оптимального роста ей необходим довольно высокий уровень снабжения элементами питания, в особенности азотом (Судницына, 1972; Казимиров и др., 1974а; Молчанов, 1974). Для оценки потребности древесных пород в элементах питания у растений, выросших в оптимальных условиях, используют данные концентрации элементов в тканях, где протекают активные физиологические процессы (листья, всасывающие корни). О потребности древесных пород судят также по концентрации элементов в древесине или по средней концентрации во всех тканях растения. Эти величины показывают затраты элементов на построение единицы органической массы. Важным показателем потребности древесных пород в элементах питания служит их общее накопление во всей массе древостоя на единице площади (в кг на 1 га). Многочисленными исследованиями установлено, что у древесных пород наиболее подходящим органом для установления уровня питания является лист (хвоя). Применимость метода листовой диагностики основана на существовании тесной взаимосвязи между концентрацией физиологически важных элементов в ассимилирующих органах и ростом растений. Недостаток азота может явиться причиной недостаточной охвоенности деревьев, развития короткой хвои зеленовато-желтого цвета (Виликайнен, Зябченко, 1974).

Для сосны получены надежные зависимости между содержанием азота в хвое и показателями роста (Ingestad, 1960; Поргасаар, 1966; Кошельков, 1968; Костылева, 1969). Ввиду того что уровень содержания элементов питания в хвое значительно колеблется в зависимости от индивидуальных условий роста деревьев, возраста ассимилирующего аппарата, генетических особенностей популяций и других факторов, образцы хвои на анализ отбираются с соблюдением ряда условий. Выработана подробная методика взятия проб с учетом возраста хвои, ее расположения в кроне и индивидуального варьирования отдельных деревьев (Казимиров и др., 1974а; Поргасаар, 1977). Обеспеченность азотом сосны считается оптимальной при содержании его в хвое от 1,8 до 3,2%, в насаждениях плохого роста количество азота в хвое равно 0,7–1,6% (Шумаков, Федорова, 1970).

В ряде работ указано на существование тесной взаимосвязи между содержанием азота в хвое и продуктивностью сосновых древостоев. Так, используя метод листового анализа при изучении режима питания сосновых лесов Эстонии, В. И. Поргасаар (1966) установил, что наиболее производительным типам сосновых лесов Эстонии соответствует наиболее высокая концентрация азота в хвое. В работе В. С. Победова, В. Е. Волчкова (1972) отмечена тесная связь бонитета древостоев сосны в Белоруссии с содержанием азота в хвое. Наибольшее количество азота определено в хвое насаждений высокого класса бонитета. Оптимальным уровнем содержания азота в хвое сосны в условиях Белоруссии следует считать 1,6–1,7%. Исследованиями А. Я. Орлова, Л. М. Орловой (1966), С. П. Кошелькова (1967) также установлена корреляционная зависимость между содержанием азота в хвое и показателями продуктивности древостоев в сосновых лесах Ярославской области. Уровень снабжения сосны азотом определяет ее рост. В наиболее продуктивных кислично-черничных сосняках содержание азота в хвое приближается к оптимальному. Недостаток азота ясно проявляется в низкопродуктивных типах леса, произрастающих на бедных азотом сухих почвах, — в сосняках мшисто-лишайниковых. Плохо снабжается азотом сосна в заболоченных местообитаниях.

Степень обеспеченности азотом сосновых древостоев в условиях Карелии считается оптимальной при концентрации его в хвое больше 1,6%, недостаточной — от 1,2 до 1,6% и очень низкой — менее 1,2% (Казимиров и др., 1974б). При анализе литературных данных выявляется большая изменчивость содержания азота в растениях, особенно в их фотосинтезирующих частях, которые отличаются повышенной концентрацией азота и солевых элементов (Ремезов и др., 1959; Молчанов, 1964; Родин, Базилевич, 1965; Поздняков и др., 1969; Кылли, Кяхрик, 1970; Говоренков, 1972; Казимиров и др., 1977). Однако установлена четкая связь между содержанием азота в хвое (%) и производительностью насаждений: I класс бонитета — 1,56–1,67, среднее — 1,62; II — 1,20–1,54, среднее — 1,41; III — 0,97–1,38, среднее — 1,17; IV — 1,03–1,22, среднее — 1,12; V класс бонитета — 0,84–1,07, среднее — 0,95. С увеличением производительности древостоя на один класс бонитета содержание азота в хвое повышается в среднем на 0,17%.

В хвое ели, так же как и сосны, из всех элементов почвенного питания наибольшая доля (30–45%) приходится на азот. В еловых насаждениях Карелии содержание азота в однолетней хвое составляет 0,92–1,47% от веса сухого вещества хвои. По сравнению с ельниками других районов Европы содержание азота в хвое ели в Карелии

несколько понижено, что связано с преобладанием в Карелии низкопроизводительных еловых насаждений.

По данным Р. К. Кылли (1971), в однолетней хвое ели в кисличных типах леса на бурых почвах Эстонии содержится 1,35–1,42% азота, у ельников на песчаных и глинистых сланцах – 1,08–1,41% (Hunger, Fiedler, 1965), в Баварии (Wehrmann, 1959) – 1,13–1,54%. Более высокое содержание азота в хвое отмечается в ельниках Центральной Европы – 1,41–1,76% (Nebe, Beness, 1965; Rehfuess, Moll, 1965) и даже до 2% (Wehrmann, 1963).

По литературным данным отмечается тесно выраженная связь производительности ельников, растущих на минеральных почвах, и содержания азота в однолетней хвое (Казимиров, Морозова, 1973):

Іб класс бонитета	– 1,48–2,0%, среднее – 1,68%;
Ia	– 1,41–1,76%, среднее – 1,59%;
I	– 1,34–1,60%, среднее – 1,48%;
II	– 1,25–1,47%, среднее – 1,37%;
III	– 1,17–1,42%, среднее – 1,28%;
IV	– 1,08–1,35%, среднее – 1,21%;
V	– 1,01–1,29%, среднее – 1,12%;
Va	– 0,92–1,17%, среднее – 1,04%.

В переувлажненных болотно-травяных ельниках Карелии, растущих на торфяно-перегнойных почвах с проточным увлажнением, содержание азота в хвое составляет 1,34%, а насаждение имеет всего лишь V бонитет. Низкая производительность ельников здесь связана с неблагоприятными гидротермическими почвенными условиями. Установлено, что в переувлажненных сосновых лесах, растущих на торфяных почвах, содержание азота в хвое низкое (1,05–1,1%), в отличие от переувлажненных ельников, растущих на богатых почвах.

В литературе также имеются сведения о взаимосвязи климатических условий и накопления азота в хвое. В насаждениях I класса бонитета в Центральной Европе и Карелии содержание азота в хвое ели различно и составляет соответственно 1,34 и 1,51%.

Таким образом, анализ литературных данных показывает взаимосвязь производительности сосновых и еловых насаждений и накопления азота в хвое, которое, в свою очередь, зависит от вида растения, климатических условий, плодородия почвы.

Когда речь идет об обеспеченности растений почвенным азотом, важно знать содержание в почве минерального азота, т. е. аммония и нитратов. Однако полученные значения сильно колеблются в течение вегетации и по отдельным годам. Если проводить анализы достаточно часто, можно получить интегрированные данные о содержании



аммония и нитратов за интересующий нас период. Такие интегрированные данные обеспечивают оценку баланса накопления и выноса азота из почвы, которые и отражают степень обеспеченности растений азотом. Однако для практических целей интегрированные значения трудноприменимы из-за большой трудоемкости их получения. Вместо этого используются различные другие способы, дающие возможность по анализу почвенного образца получить показатель количества минерального азота, которым почва может обеспечивать растение в течение длительного периода. Из множества методов широко применяемым является метод компостирования.

Азот органического вещества, прочно связанного с твердой фазой почвы, по-видимому, недоступен растениям, но азот растворимых органических веществ почвенного раствора, несомненно, отчасти доступен (Блэк, 1973). Определения растворимых органических соединений азота, доступных для питания растений, трудны вследствие низкой концентрации этих веществ, их разнообразия и быстроты, с которой они превращаются в другие соединения. Основная масса химически связанного азота, доступная для поглощения растениями в любой момент, — это сумма обменного аммония поглощающего комплекса почвы, аммония, нитритов и нитратов, содержащихся в почвенном растворе. Данная концепция является общепринятой. Многочисленные исследования содержания элементов минерального питания растений в лесных насаждениях различной продуктивности позволили разработать шкалы обеспеченности насаждений, в том числе и азотом.

Оценка обеспеченности лесных насаждений азотом в Карелии дается на основании показателей содержания общего азота по методу Кьельдаля в органическом веществе лесной подстилки. Если концентрация общего азота в подстилке выше 2% (от веса абсолютно сухого вещества), сосна и ель обеспечены азотом; при 1,6–2,0% — испытывают относительно небольшой недостаток; менее 1,5% — острый дефицит. Обеспеченность торфяных почв азотом оценивается по общему содержанию элемента и его соотношению с количеством углерода в корнеобитаемом слое. Очень хорошая обеспеченность — при содержании азота  $> 2,0\%$  при  $C : N = 26$ ; средняя — 1,9–1,2% N при  $C : N = 27–32$ ; низкая — 1,2% азота при отношении  $C : N = 33$ .

Однако общее содержание азота в почве не всегда определяет наличие доступных для питания растений соединений. Кроме того, потребность в элементах минерального питания у различных видов растений различна. Если хвое-лиственная диагностика обеспеченности хвойных пород азотом разработана достаточно хорошо,



то оценка азотного питания по результатам почвенных анализов — крайне слабо.

На основании изучения фракционного состава азотных соединений в почвах и продуктивности сосновых и еловых насаждений попытались установить зависимости запасов фитомассы и ее годовичного прироста в насаждениях от количества азотсодержащих соединений в корнеобитаемом слое почвы.

Используя корреляционный и регрессионный анализ, установили тесную прямую зависимость количества фитомассы в сосновых насаждениях от запасов общего (1), щелочногидролизуемого (2) и минерального азота (3) в 50-сантиметровом слое почв в условиях нормального увлажнения, которое описывается следующими уравнениями:

$$1) y = 0,4091x^2 - 0,9313x + 1,4294; R = 0,979$$

$$2) y = 1,4101x^2 - 4,0499x + 3,781; R = 0,919$$

$$3) y = 11,895x^2 - 10,589x + 3,2466; R = 0,906$$

Для гидроморфных условий эта зависимость обратная и описывается следующим рядом уравнений:

$$4) y = 0,0664x^2 - 0,7644x + 2,7457; R = -0,731$$

$$5) y = 0,0434x^2 - 0,4773x + 2,1389; R = -0,948$$

$$6) y = 0,0434x^2 - 0,4773x + 2,1389; R = -0,929$$

Ежегодный прирост фитомассы соснового древостоя тесно связан с запасами минерального (7, 9) и щелочногидролизуемого азота (8, 10) в слое почвы 0—50 см. Для условий нормального увлажнения эта зависимость прямая, избыточного увлажнения — обратная. Указанные взаимосвязи описываются следующими уравнениями:

$$7) y = 57,345x^2 - 51,389x + 17,332; R = 0,913$$

$$8) y = 6,7736x^2 - 19,563x + 19,846; R = 0,895$$

$$9) y = 7,2243x^2 - 21,527x + 20,835; R = -0,963$$

$$10) y = 0,2234x^2 - 2,6581x + 12,687; R = -0,946$$

Установлена прямая корреляционная зависимость количества фитомассы елового древостоя (11) и фитомассы насаждения в целом (12) от валовых запасов азота в слое почвы 0—25 см. Эта зависимость в еловых лесах менее тесная, чем в сосняках. Для условий нормального увлажнения указанные закономерности описываются следующими уравнениями:

$$11) y = -0,9045x^2 + 4,5823x - 4,1261; R = 0,698$$

$$12) y = -0,8893x^2 + 4,5045x - 4,0299; R = 0,697$$

Таким образом, в условиях Фенноскандии одним из важнейших факторов, определяющих продуктивность сосновых и еловых лесов, являются запасы общего и лабильного азота в корнеобитаемом слое почв.

## Выводы

Интенсивность перемещения азота в лесных насаждениях характеризуется значительными колебаниями и зависит от экологических условий и возраста насаждений.

В сосновых насаждениях возврат азота в почву по отношению к выносу его из почвы растениями составляет существенную величину. В высокопроизводительных насаждениях этот показатель достигает 82–84%, в низкопроизводительных – 87–91%. Это свидетельствует о значительном пополнении запаса почвенного азота за счет растительного опада.

Сравнивая запасы минерального азота в почвах и вынос элементов минерального питания сосняками, пришли к заключению, что азотный режим в автоморфных насаждениях складывается напряженно. В гидроморфных почвах отмечается накопление минеральных азотсодержащих соединений в связи со слабым их использованием.

На построение годового прироста древостоем в средневозрастных сосняках брусничных и черничных выносятся 43–47%, а в багульниково-сфагновых – 14% запасов минерального азота корнеобитаемого слоя почв.

В средневозрастных еловых насаждениях также значительная часть азота, поглощенного растениями на построение прироста в течение года, возвращается в почву с опадом: в ельниках лишайниково-каменистых – 74%, в высокопроизводительных ельниках черничных и кисличных – 77–80%, в переувлажненных долгомошных и болотно-травяных – 79–85%. Однако количество минеральных соединений азота в корнеобитаемом слое автоморфных почв мало и примерно равно выносу азота насаждением в течение года.

Построение концептуально-балансовых моделей позволило выявить особенности структуры и функционирования сосновых и еловых насаждений разного возраста и хозяйственного воздействия. Высокопродуктивные сосновые ценозы среднетаежной подзоны характеризуются довольно высоким запасом азота в первичной продукции. В средневозрастных сосняках черничных этот показатель составляет  $12,5 \text{ кг} \cdot \text{га}^{-1}$ , закрепляется 23,6% азота от потребления, а возвращается – 76%. В перестойных насаждениях содержание азота в первичной продукции более  $16 \text{ кг} \cdot \text{га}^{-1}$ , закрепляется 36,7% от потребления, а возврат составляет 63,3%.

Во всех биогеоценозах преобладает азот, входящий в мертвое органическое вещество – гумус.

В средневозрастных и перестойных насаждениях активно протекают процессы деструкции органических азотсодержащих соединений

опада, однако отчетливо прослеживается напряженность режима азотного питания.

Многие противоположно направленные процессы превращения азотсодержащих соединений в 165-летнем сосновом биогеоценозе уравниваются: иммобилизация и деструкция белка почвенных микроорганизмов, гумификация и деструкция гумуса, аммонификация и образование лабильных форм органического азота.

В более молодом насаждении эти процессы не уравновешены: превалирует иммобилизация азота в белках тел микроорганизмов, прослеживается преобладание процессов гумификации над деструкцией гумусовых соединений. Аммонификация идет более активно, чем накопление лабильного органического азота.

В результате 40%-го изреживания средневозрастного соснового древостоя происходят изменения как в структуре, так и в характере функционирования экосистемы. Отмечен высокий запас азота в первичной продукции ( $17,7 \text{ кг} \cdot \text{га}^{-1}$ ), закрепление азота растительностью составляет 39,9, а возврат с опадом — 60,7% от потребления минерального азота. Изреживание древостоя приводит к активизации процессов разложения опада. В почвах интенсивно идет накопление азота гумуса, одновременно с этим активны процессы минерализации и, как следствие, наблюдается обеднение почвы лабильным органическим азотом.

На концентрированной вырубке общий запас фитомассы по сравнению с исходным средневозрастным сосновым насаждением снижается примерно в 5 раз. Содержание азота в первичной продукции составляет всего  $0,7 \text{ кг} \cdot \text{га}^{-1}$ . Закрепление азота растительностью — 5% от потребления, 95% возвращается с опадом растений напочвенного покрова. Более интенсивно, чем в других исследованных биогеоценозах, протекает разложение опада, азотсодержащих соединений гумуса, минерализация лабильного органического азота.

Во всех изученных экосистемах баланс азота положительный, все системы накапливают азот как во внутреннем цикле, так и за счет внешних поступлений. Степень замкнутости круговорота азота высокая, что свидетельствует о значительной устойчивости сосновых экосистем, произрастающих на песчаных иллювиально-железистых подзолах.

В сосняках северотаежной подзоны содержание азота в первичной продукции составляет  $13,0 \text{ кг} \cdot \text{га}^{-1}$ , т. е. несколько ниже, чем в средней тайге. В насаждении закрепляется 54,3% от потребления. Деструкция органических азотсодержащих соединений растительных остатков протекает менее интенсивно, чем в среднетаежной подзоне. Характерно существенное преобладание азота, входящего в мортмассу, над количеством азота в живом веществе (в 9 раз, в средней тайге — в 2,5 раза).

Крайне низок запас белкового азота микроорганизмов. Отчетливо прослеживается напряженность режима азотного питания, острый недостаток минерального азота. Многие противоположно направленные процессы уравниваются: гумификация и деструкция гумуса, иммобилизация и деструкция белка почвенных микроорганизмов, аммонификация и образование лабильного азота. Система довольно устойчива, и баланс азота положительный.

В еловых насаждениях прослеживаются как общие закономерности, характерные для хвойных лесов, так и специфические, обусловленные особенностями почв и вида растительности. Здесь также отмечена напряженность режима азотного питания, однако в значительно меньшей степени, чем в сосняках. Тенденция ежегодного обеднения почв минеральным азотом не наблюдается. Закрепление азота в растительном блоке составляет 20,5%, а остальной азот возвращается в почву. Деструкция белкового азота растительных остатков идет интенсивно. Однако запасы азота в мортмассе в 5 раз превышают количество азота в живых организмах. Довольно высок запас белкового азота тел микроорганизмов, но он существенно ниже, чем в сосняках среднетаежной подзоны. Степень замкнутости круговорота высокая, баланс азота положительный.

Запасы общего, щелочногидролизуемого и минерального азота в корнеобитаемом слое почв сосновых лесов увеличиваются по мере нарастания увлажненности почв, в то время как количество азота в хвое, достигая максимума в сосняке черничном свежем, постепенно снижается. Оптимальными следует считать запасы общего азота в 50-сантиметровом слое почв  $2 \text{ т} \cdot \text{га}^{-1}$  для сосняков и  $3,4 \text{ т} \cdot \text{га}^{-1}$  для ельников в слое 0–25 см.

Проведенные исследования показали, что запас фитомассы соснового древостоя и насаждения в целом тесно связан с количеством азота в почве. О прямой зависимости запаса фитомассы в насаждении от количества общего, щелочногидролизуемого и минерального азота в почве можно говорить лишь при условии нормального увлажнения. При первых признаках переувлажнения, которые отмечаются в сосняке черничном влажном, увеличение запасов азота в почве не ведет к повышению продуктивности насаждения.

Оптимальными запасами щелочногидролизуемого азота в 50-сантиметровом слое почв сосновых лесов можно считать  $0,2 \text{ т} \cdot \text{га}^{-1}$ , а минерального —  $60 \text{ кг} \cdot \text{га}^{-1}$ , что соответствует запасам в почвах наиболее продуктивных сосняков черничных.

Установлено, что ежегодный прирост фитомассы соснового древостоя и насаждения в целом тесно связан с наличием подвижного азота в почвах. С увеличением запасов щелочногидролизуемого

и минерального азота в лесных подстилках и корнеобитаемой толще возрастает ежегодный прирост фитомассы. В переувлажненных сосняках увеличение запасов лабильного азота не приводит к большому приросту фитомассы.

Тесная прямая зависимость запасов фитомассы древостоя и елового насаждения в целом выявлена от количества общего азота в корнеобитаемом слое почв (0–25 см).

Следует отметить, что коэффициент корреляции, характеризующий зависимость продуктивности сосновых лесов от запасов азота в почве, более высокий (0,9 и более), чем для еловых насаждений (0,6–0,7).

Для повышения продуктивности насаждений на переувлажненных почвах необходимо проведение гидромелиорации с целью повышения доступности имеющегося азота, а для автоморфных почв с небольшим запасом азотсодержащих соединений следует увеличивать содержание азота путем внесения азотных удобрений.

## **Глава 8**

# **ВЛИЯНИЕ АНТРОПОГЕННЫХ ФАКТОРОВ НА ЛЕСНЫЕ ПОЧВЫ**

### **8.1. Воздействия рубок различной интенсивности**

При возрастании антропогенного воздействия на лесные экосистемы существенное значение имеет выявление степени допустимой антропогенной нагрузки. К основным антропогенным факторам динамики структуры и породного состава таежных лесов относятся рубки (Зябченко, 1984), способ ведения которых определяет глубину экологических и почвенно-биологических изменений. Выборочная рубка леса вызывает изменение микроклиматических условий на вырубаемой территории, а следовательно, водно-физических и химических свойств почв. Еще более резкие изменения происходят на сплошных вырубках.

Воздействие различных способов рубки, а также применяемых механизмов на свойства почв в Карелии изучали А. В. Побединский (1961, 1973, 1979, 1980), Г. Е. Пятецкий, Р. М. Морозова (1962), Р. М. Морозова (1964а, б), Н. В. Егорова, В. К. Куликова (1965), В. К. Куликова, Р. М. Морозова (1978), И. П. Лазарева, С. С. Зябченко (1983), Н. Г. Федоренко (1983б). Дан анализ воздействия различных видов лесозаготовок на сохранение подроста, экологическая и лесоводственная оценки отечественной лесозаготовительной техники. Авторы проследили изменения водного и воздушного режима почв, химических свойств на рубках различного возраста и в различных экологических условиях.

Установлено, что в первую очередь на рубке изменяются метеорологические условия (освещенность, температура воздуха и почвы, количество осадков, попадающих в почву, и ее влажность).

На сплошных рубках отмечается изменение морфологического строения верхней части профиля почвы, нижние горизонты не изменяются. Происходит энергичное прогревание почвы по всему профилю, температура ее на рубке значительно выше, чем под пологом леса. Особенно сильно прогреваются почвы на вересково-паловых и вересково-лишайниковых рубках на месте вересково-лишайниковых и брусничных сосняков. В середине вегетационного периода температура поверхности почвы может достигать 50 °С. В этот же период наблюдается



сильное иссушение почвы. Малоомощные иллювиально-железистые песчаные подзолы этих вырубок, бедные органическим веществом и азотом, еще больше обедняются гумусом в результате энергичной минерализации органического вещества. Одновременно происходит накопление гумуса в нижележащих горизонтах за счет выноса подвижных органических кислот.

Уничтожение растительности при вырубке древостоя на легких почвах способствует развитию эрозионных процессов.

На вырубках из-под различных типов леса и в различном рельефе изменения свойств почв протекают по-разному. Основной причиной этого является различный характер увлажнения почвы под пологом леса и затем на вырубке (наличие или отсутствие процесса заболачивания почвы), а также неодинаковые физические и химические свойства почвы в различных типах леса до рубки древостоя.

Развитие процесса заболачивания почвы после рубки леса вызывает более заметные изменения физических и химических свойств почвы, чем при отсутствии заболачивания на вырубке или наличии процесса заболачивания почвы уже под пологом леса. Заметные изменения физических свойств почвы вырубков (объемный вес, скважность) наблюдаются до глубины 50–60 см, а химических — только до 30–40 см.

В результате проведенных исследований сделан вывод об ухудшении лесорастительных свойств почв на вырубках из-под ельников черничных влажных и долгомошных, а также на вересково-паловых вырубках.

Выборочные и постепенные рубки оказывают значительно меньшее воздействие на свойства почвы. В ряде работ (Солнцев, 1955; Бурсова, 1959) отмечается улучшение пищевого режима подзолистых почв в связи с группово-выборочными рубками. В результате осветительной рубки еловых насаждений повышается интенсивность процессов гумификации и минерализации органических остатков лесной подстилки. Выборочные рубки почти не отражаются на морфологическом строении минеральных горизонтов почвы, поскольку лесной ценоз сохраняется, хотя древостой и насаждение в целом претерпевают существенные изменения. При постепенной и группово-выборочной рубке древостоя увеличивается поступление растительных остатков, активизируется деятельность грибов и актиномицетов (Тягны-Рядно, 1959), что способствует гумификации и минерализации растительных остатков. Отмечено, что происходит более интенсивная минерализация подстилок и перераспределение по профилю органического вещества и валового азота. Даже частичная рубка древостоя отражается на влажности почв: в сухое время года верхний слой подстилок иссушается сильнее, чем под пологом леса. Влажность же минеральных горизонтов почвы обычно ниже на ненарушенных участках.

Существует мнение, что эти рубки способствуют улучшению производительности лесов.

Однако, несмотря на значительное число исследований влияния рубок на свойства лесных почв, изменения в азотном режиме мало изучены. В связи с вышесказанным в среднетаежной подзоне Карелии на стационарных пробных площадях нами проводилось изучение воздействия различных систем рубок на азотный фонд песчаных иллювиально-железистых подзолов, сформировавшихся на двучленных отложениях, имеющих в профиле прослойки утяжеленного механического состава. Исследовались почвы высокопродуктивных сосняков черничных 50-летнего возраста, пройденных выборочными рубками (изреживание древостоя 40% до полноты 0,5), а также на сплошной вырубке. Контролем служила почва в сосняке 50-летнего возраста, не тронутом лесохозяйственными мероприятиями с момента своего возникновения. Исследования проводили через два года после рубки древостоя, основная масса порубочных остатков с опытных участков была удалена.

Изучение температурного режима почв на опытных объектах (рис. 38) свидетельствует об усилении прогревания почвы как при выборочных рубках, так и на сплошной вырубке. В первую очередь это касается поверхности почвы, тенденция наблюдается до глубины 40 см, а в отдельных случаях и глубже. Отмечаются более резкие колебания температур на вырубке в течение года по сравнению с участками почвы, покрытыми лесом.

Исследование режима увлажнения почв на вариантах опыта показало (рис. 39) снижение влажности подстилок на вырубке и участке с изреживанием древостоя по сравнению с почвами ненарушенного насаждения. Если в первый год исследований наименьшая влажность подстилок наблюдалась в изреженном насаждении, то в последующие годы — на вырубке.

При изучении почвообразования в лесной зоне, в особенности азотного режима, нельзя обойти вниманием лесную подстилку. От качественного состава подстилок, интенсивности протекающих в них процессов гумификации и минерализации, активности биохимических процессов зависит уровень трофности почвы. Все процессы превращения азотных соединений теснейшим образом связаны с количественным и качественным составом органического вещества. Сравнивая на опытных объектах строение подстилок, отмечаем существенные различия: в сосняке 50 лет, не изреженном рубкой, мощность подстилки 4–5 см, содержание органического углерода составляет 45,6%. В результате изреживания древостоя и активизации процессов деструкции органического вещества в связи с лучшей освещенностью и прогреванием поверхности почвы мощность подстилки в 50-летнем изреженном сосня-

ке составляет 4 см, а на сплошной вырубке — 2–3 см. Содержание углерода 42,7 и 44,4% соответственно. Наибольшая плотность подстилки на вырубке — 0,2 г/см<sup>3</sup>, в сосняках она колеблется от 0,085 до 0,1 г/см<sup>3</sup>.

В подстилке 50-летнего соснового насаждения количество общего азота составляет 0,969–1,46%, а в насаждении, пройденном рубкой, — 0,762–1,48, отмечается уменьшение его содержания в подгоризонте F и обогащение минеральных горизонтов. В подстилке подзола на вырубке количество общего азота значительно ниже и составляет 0,561–1,35%, хотя обогащения минеральных горизонтов не наблюдается.

Разреживание древостоя привело, по нашим данным, к заметному изменению содержания в почвах общего азота (табл. 52).

Таблица 52

Содержание азотных соединений в подзолах песчаных иллювиально-железистых на двучленных отложениях в связи с рубкой древостоя, мг на 100 г а. с. почвы

Горизонт, глубина, см	Общий азот	Азот щелочногидролизуемый (по Корнфилду)			N-NO <sub>3</sub>	Минеральный (N-NH <sub>4</sub> + N-NO <sub>3</sub> )	Негидролизуемый
		N-NH <sub>3</sub>	лабильный органическ.	сумма			
Сосняк черничный 50 лет							
L 0—1(2)	1462,9	18,7	56,5	76,2	0,74	19,44	1385,96
F 1(2)—4(5)	963,6	4,3	15,7	20,0	0,10	4,40	913,5
A2 5—10	71,7	1,2	1,1	2,3	0,11	1,31	69,29
Bf 10—26	73,0	1,1	2,9	4,0	0,07	1,17	68,93
B2 26—40	62,8	1,9	0,1	2,0	0,06	1,96	60,74
II B3 40—50	50,0	0,9	1,5	2,4	0,03	0,93	47,57
BC1 50—70	10,0	1,4	1,2	2,6	0,01	1,41	7,39
Сосняк черничный 50 лет, 40% изреживания древостоя							
L 0—1(2)	1477,0	21,2	47,5	68,7	0,71	21,91	1407,59
F 1(2)—4	762,4	3,5	15,3	18,8	0,14	3,64	743,46
A2 4—8	117,8	1,3	2,7	4,0	0,11	1,41	113,69
Bf 8—26	123,4	1,3	2,3	3,6	0,05	1,35	119,75
B2 26—37	70,3	1,0	0,7	1,7	0,05	1,05	68,55
BC1 37—70	42,0	1,0	0,8	1,8	Нет	1,0	39,2
BC2 70—глубже	34,0	0,8	0,8	1,6	Нет	0,8	32,4
Вырубка							
L 0—0,5	1350,0	21,2	44,3	65,5	0,62	21,82	1283,88
F 0,5—2(3)	560,8	4,8	13,1	17,9	0,13	4,93	542,73
A2 2(3)—14	68,1	1,4	1,1	2,5	0,29	1,69	64,31
Bf 14—30	88,8	1,2	2,2	3,4	0,15	1,35	85,25
B2 30—50	60,0	2,0	1,0	3,0	0,04	2,04	56,96
B3 50—71	45,0	0,88	1,6	2,5	0,02	0,90	42,48
II BC1 71—глубже	Не опр.	0,81	0,3	1,1	0,01	0,82	—

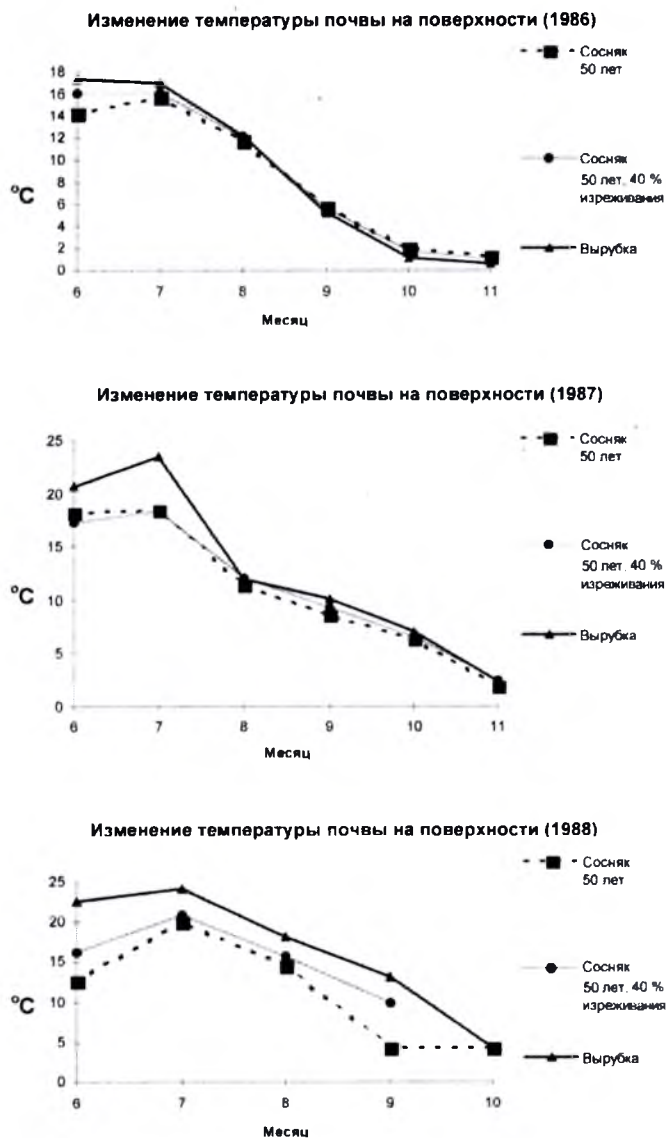
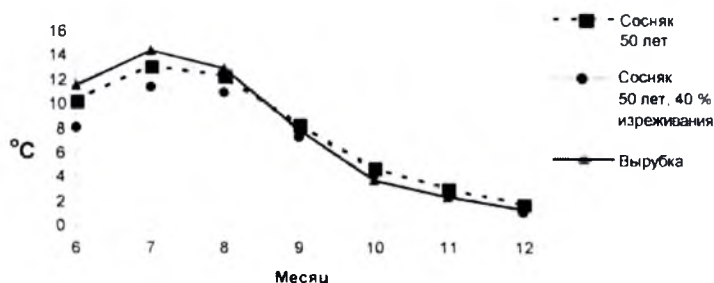
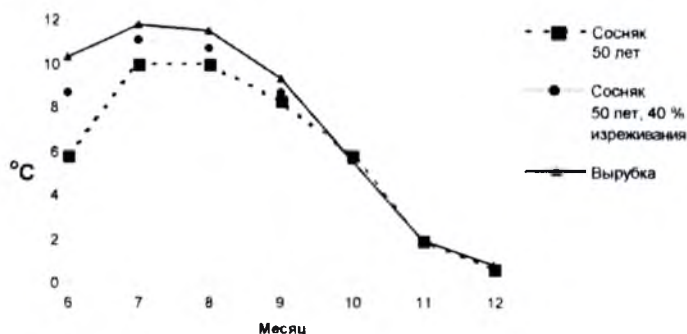


Рис. 38. Температурный режим

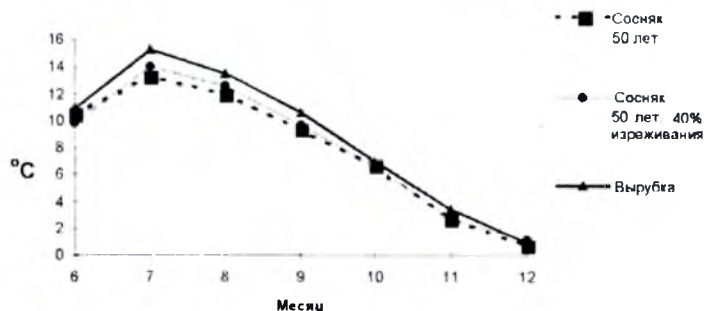
Изменение температуры почвы на глубине 20 см (1986)



Изменение температуры почвы на глубине 20 см (1987)



Изменение температуры почвы на глубине 20 см (1988)



почв при рубке

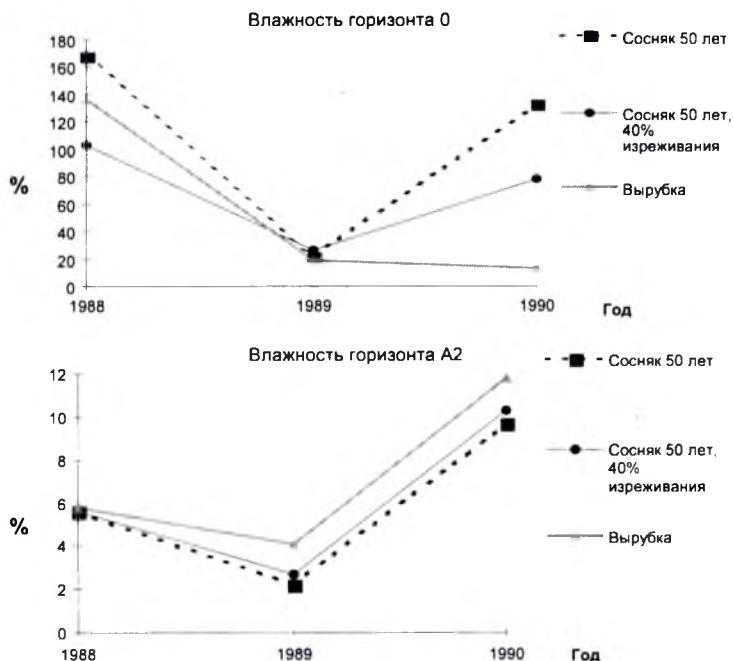
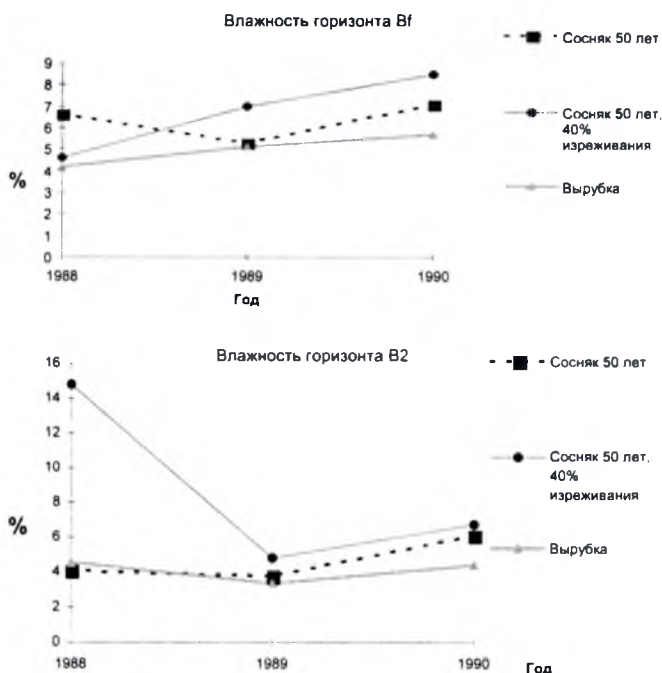


Рис. 39. Изменение влажности почв

Интересно отметить, что в подстилках и минеральных горизонтах подзолов на различных вариантах опытных объектов количество минерального азота (в мг на 100 г) мало различается. То же можно сказать и о содержании в почвах щелочногидролизуемого азота.

На рис. 40 показана изменчивость содержания в подстилках минерального азота: на вырубке прослеживается тенденция накопления в почве минерального азота в середине вегетационного периода, т. е. в период, наиболее благоприятный для жизнедеятельности микроорганизмов, ответственных за переход органических форм в простые минеральные соединения азота. Несколько иная тенденция отмечается в почвах спонтанного и изреженного сосняков 50-летнего возраста, где в середине вегетации определены наименьшие количественные показатели минерального азота, что объясняется активным поглощением корневой системой древостоя (кроме 1989 г., характеризующегося крайней сухостью в весенние месяцы).





при вырубке древостоя

Характер годичной динамики как минерального, так и легкогидролизуемого азота в почвах 50-летних спонтанных и изреженных насаждений аналогичен, наблюдаются колебания в сторону то уменьшения,

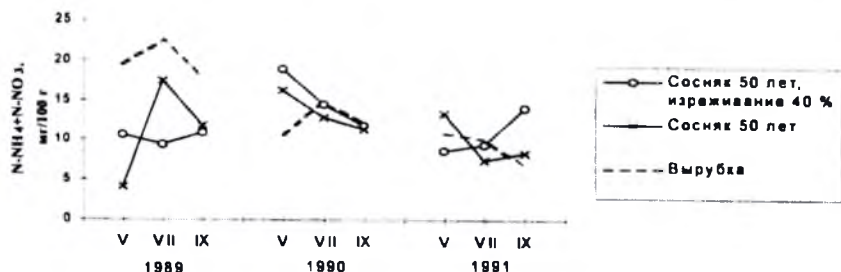


Рис. 40. Динамика минерального азота в почвах сосняков в связи с рубкой древостоя

то увеличения (рис. 41). На вырубке прослеживается тенденция уменьшения количества минерального азота в почве, как мы предполагаем, в первую очередь, в результате выноса за пределы почвенного профиля, а также поглощения молодой древесной порослью, которая возобновляется на вырубке.

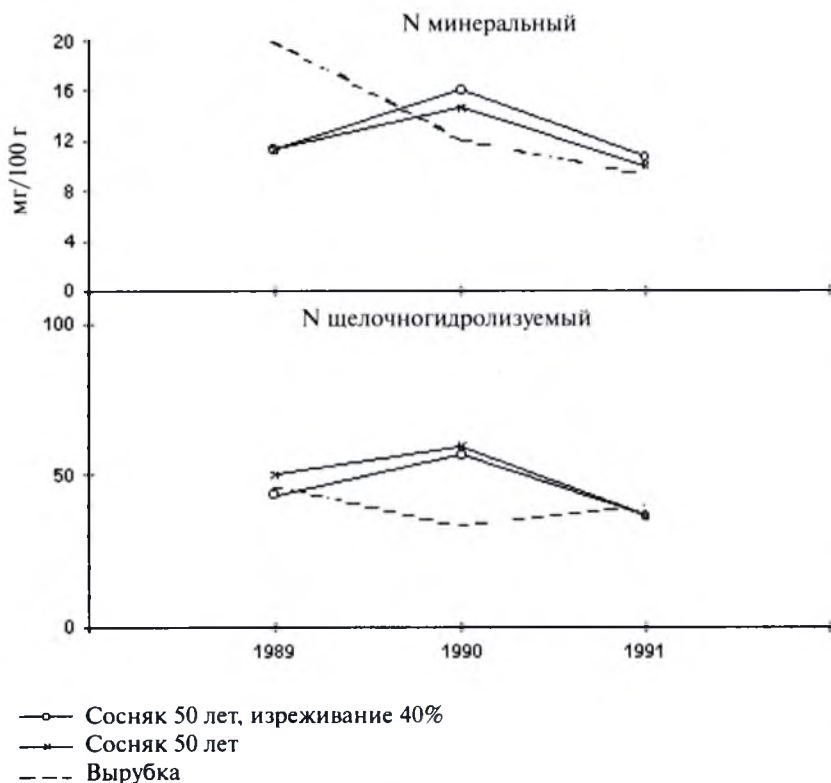


Рис. 41. Влияние рубки древостоя на характер годичной динамики минерального и гидролизуемого азота в почвах сосняков

Об аммонифицирующей и нитрифицирующей способности почв судили по изменению содержания в почве аммония и нитратов в процессе компостирования образцов при температуре 28 °С и влажности 60% ПВ. Наибольшей способностью к аммонификации обладали

подстилки 50-летнего соснового насаждения с изреживанием 40%. Здесь же отмечены наибольшие запасы минерального азота в почве, находящейся в естественных условиях (рис. 42).

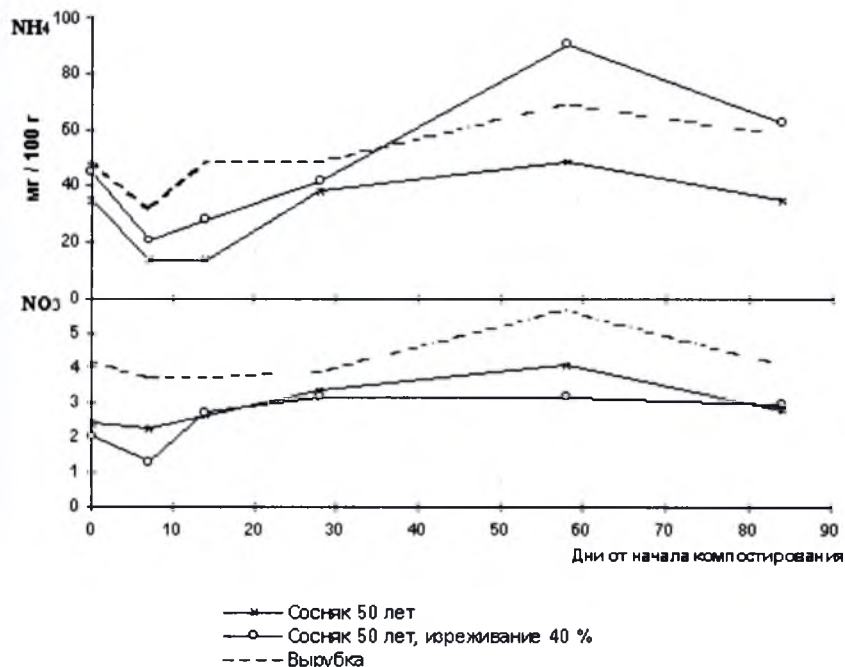


Рис. 42. Аммонифицирующая и нитрифицирующая способность лесных подстилок сосновых лесов

Наименьшей аммонифицирующей способностью обладали почвы 50-летнего сосняка, что также согласуется с нашими данными по запасам азота в почвах. Выявлено, что наибольшей нитрифицирующей способностью отличаются органогенные горизонты почв вырубки. Однако в связи с высокой подвижностью нитратов и, вероятно, их вымыванием из песчаной почвы накопления их в почвах вырубки не происходит. Наивысших показателей процессы аммонификации и нитрификации достигли лишь на 56-й день компостирования, поэтому можно предположить, что широко практикуемый метод двухнедельного компостирования не дает полной картины этих процессов в лесных почвах.

Аммонификация в оптимальных условиях протекает более интенсивно, чем нитрификация, как и в естественных условиях в лесных насаждениях таежной зоны, т. е. процессы разложения органического вещества в почве связаны не только с гидротермическими условиями, но, в первую очередь, с качественным составом самого органического опада.

Определение запасов общего азота и азотных соединений в лесных подстилках и 50-сантиметровом слое почв (табл. 53, 54) свидетельствует об обогащении лесных подстилок и корнеобитаемого слоя почвы минеральным и лабильным азотом в нарушенных насаждениях. Разреживание средневозрастных сосновых древостоев привело к снижению запасов общего азота в подстилке, но к обогащению минеральных почвенных горизонтов. Запасы его на вырубке в 50-сантиметровом слое достаточно велики, в то время как подстилка значительно

Таблица 53

Запасы азота в подстилках подзолов песчаных иллювиально-железистых на двучленных отложениях в естественных и нарушенных сосновых насаждениях

Вариант опыта	Общий, кг · га <sup>-1</sup>	Минеральный (N-NH <sub>4</sub> + N-NO <sub>3</sub> )	Лабильный (по Корнфилду) (N-NH <sub>4</sub> + орг. азот)	Негидро- лизующий
Сосняк черничный		<u>5,1</u>	<u>20,4</u>	<u>495,3</u>
50 лет	515,7	1,0	4,0	96,0
Сосняк черничный		<u>10,2</u>	<u>35,0</u>	<u>860,8</u>
50 лет, 40% изреживания	416,5	2,4	8,4	91,6
Вырубка	382,2	<u>5,4</u>	<u>16,7</u>	<u>365,5</u>
		1,4	4,4	95,6

*Примечание.* Здесь и в табл. 54: в числителе — кг · га<sup>-1</sup>, в знаменателе — % от общего азота.

Таблица 54

Запасы азота в 50-сантиметровом слое подзолов песчаных иллювиально-железистых на двучленных отложениях в естественных и нарушенных сосновых насаждениях

Вариант опыта	Общий, кг · га <sup>-1</sup>	Минеральный (N-NH <sub>4</sub> + N-NO <sub>3</sub> )	Лабильный (по Корнфилду) (N-NH <sub>4</sub> + орг. азот)	Негидро- лизующий
Сосняк черничный		<u>93,5</u>	<u>194,5</u>	<u>4363,5</u>
50 лет	4558	2,1	4,3	95,7
Сосняк черничный		<u>85,2</u>	<u>198,5</u>	<u>6615,5</u>
50 лет, 40% изреживания	6395	1,3	3,1	96,9
Вырубка	5040	<u>121,3</u>	<u>214,8</u>	<u>4825,2</u>
		2,4	4,3	95,7

беднее, чем в ненарушенном 50-летнем насаждении и в разреженном сосняке. Отсюда следует, чтобы не допустить обеднения почв азотом после сплошной рубки, необходимы лесовосстановительные мероприятия уже в первые пять лет.

Разреживание древостоя способствует включению в биологический круговорот негидролизуемых азотсодержащих веществ лесных подстилок.

На ранних стадиях онтогенеза антропогенных экосистем микробиоценозы являются наиболее информативной диагностической компонентой, способной в силу высокой адаптации быстро реагировать на смену экологических условий и менять функциональную нагрузку (Сорокин, 1990). Как показали исследования Л. М. Загумальской (1993), рубки приводят к снижению численности большинства групп микроорганизмов в лесных подстилках и возрастанию — в минеральных горизонтах, что связано с поступлением высвобождающихся из подстилок легкоподвижных питательных веществ. Высокая численность олигонитрофилов на вырубках свидетельствует об их пионерной роли в освоении новых экологических условий. Из биоредукторов значительно все уменьшилось количество актиномицетов. Частичное нарушение органогенного слоя, потеря органического вещества, изменение состава и фитомассы напочвенного покрова приводят к снижению количества гетеротрофных форм.

Но более сильное прогревание почвы и достаточное увлажнение способствовали развитию аэробных форм микроорганизмов. Характерным для почв вырубок является довольно высокий уровень минерализации органического вещества при сравнительно низких показателях численности целлюлозоразрушающих микроорганизмов.

Что касается углеводов, то сразу после рубки содержание углеводных компонентов не изменяется, незначительные изменения претерпевает состав углеводной фракции. Вследствие разреживания и полного удаления древостоя снижается обогащенность органогенного горизонта водорастворимыми и легкогидролизуемыми углеводами.

Поступление свежих растительных остатков в результате рубки основного древостоя обуславливает высокую активность почвенных целлюлаз по сравнению с ненарушенным насаждением. Уменьшается инвертазная активность в лесных подстилках, что указывает на снижение запасов моно- и олигосахаридов. Если в лесных подстилках наблюдается снижение биохимической активности ферментов: протеазы, уреазы, инвертазы, то целлюлазная активность возрастает, каталазная — не изменяется. В минеральных же горизонтах значительно

возрастает активность протеазы и уреазы, особенно на вырубке, что согласовывается с данными о накоплении азота в 50-сантиметровом слое почв (см. табл. 54) после вырубки древостоя. По данным, полученным Л. М. Загуральской (1993), можно заключить, что разреживание сосняков на подзолистых почвах легкого механического состава оказывает положительное влияние на продуцирование аммиачного и аминного азота, высокоактивных каталаз и целлюлаз (табл. 55). Процессы трансформации растительного материала в нарушенном насаждении сопровождаются снижением содержания гумуса и сужением отношения  $C : N$  с 30 до 27.

Таблица 55

Изменение количественного состава микрофлоры подзолов иллювиально-железистых песчаных на двучленных отложениях при разреживании сосновых древостоев и вырубке (данные Л. М. Загуральской, 1993), тыс.  $\cdot \text{г}^{-1}$

Объект исследования	Генетический горизонт	Бактерии				Актиномицеты	Микробиоты	Целлюлозоразрушающие микроорганизмы
		аммонифицирующие	олигонитрофильные	усваивающие минеральный азот	олиготрофные			
50-летний сосняк	0	4408	9579	5034	5528	153,6	585	2,2
	A2	183	533	116	171	1,7	49	1,3
50-летний сосняк, 40% изреживания	0	3646	8358	4930	4189	119,9	410	5,2
	A2	209	741	617	408	0,4	31	3,5
Сплошная рубка	0	3829	6809	2093	2293	16,2	564	4,9
	A2	235	817	142	183	2,5	42	4,3

Изучение величин возможных потерь азота в газообразной форме из почвы в результате сплошной рубки леса показало, что интенсивность продуцирования почвами газообразного азота ( $\text{NH}_3$ ) динамична и колеблется в течение вегетационного периода согласно колебаниям температуры и влажности и связанной с ними деятельностью микроорганизмов-деструкторов органического вещества. Наибольшая интенсивность выделения из почвы аммиачного азота наблюдается в середине вегетационного периода (июнь, июль, август) (табл. 56). Потери азота из почвы в газообразной форме в целом невелики и составляют в средневозрастном сосновом насаждении около  $12 \text{ г} \cdot \text{га}^{-1}$  за вегетационный период (май – октябрь). Сплошная рубка древостоя приводит к увеличению этого показателя в два раза ( $21,5 \text{ г} \cdot \text{га}^{-1}$ ). Потери минерального азота с внутрпочвенным стоком составляют в сосняке 9, на вырубке –  $47 \text{ г} \cdot \text{га}^{-1}$  в год.



Таблица 56

Изменение интенсивности выделения газообразного азота ( $\text{NH}_3$ ) из лесных подстилок в течение вегетационного периода в результате вырубки древостоя, г в час с 1 га

Вариант опыта	Май	Июнь	Июль	Август	Сентябрь	Октябрь
Сосняк черничный 50 лет	0,011	0,0015	0,016	0,010	0,0015	0
Сплошная вырубка	0,004	0,0074	0,026	0,021	0,0015	0

### Выводы

Таким образом, исследования показали, что выборочная рубка приводит к изменению характера динамики подвижного азота в почве и увеличению интенсивности образования его минеральных и лабильных органических форм.

Абсолютные и относительные показатели содержания подвижного азота в почвах нарушенных экосистем выше, чем в естественных насаждениях. Обогащение почв подвижными соединениями идет за счет органического вещества подстилки, где доля негидролизующихся соединений в составе азотного фонда почв снижается.

Выборочную рубку можно считать мероприятием, обеспечивающим трансформацию органических соединений опада и лесной подстилки.

При сплошной рубке интенсивное образование минеральных форм азота ведет к их потерям из экосистемы.

## 8.2. Применение минеральных удобрений

Опыты по применению минеральных удобрений в лесах Карелии проводились с 1965 г. в течение 30 лет в еловых и сосновых насаждениях среднетаежной подзоны (Морозова и др., 1971; Казимиров и др., 1972, 1974а, б; Коржицкий, Куликова, 1974; Коржицкий, 1975; Куликова, Морозова, 1978; Федорев, 1982, 1983а).

### Химические свойства почв ельников и минеральные удобрения

Первые опыты, в которых изучали воздействие минеральных удобрений и известковых материалов на лесные биогеоценозы, были заложены в ельнике черничном 2 класса возраста, сформировавшемся на песчаных иллювиально-гумусово-железистых подзолах на сильно

завалуненной супесчаной морене: 0 (0–4) – A1A2 (4–7) – A2 (7–15) – B1 (15–37) – B2 (37–60) – BC (60–114) – C (114–123). Схема опыта показана в табл. 57. Обильное развитие мохового и кустарничкового покрова способствует образованию грубогумусной подстилки с высоким содержанием органического вещества ( $C = 41\text{--}43\%$ ). Минеральные горизонты бедны гумусом и азотом, которые в основном сосредоточены в лесной подстилке. Почва характеризуется высокой актуальной кислотностью ( $pH$  лесной подстилки 3,2–3,6), резко снижающейся в минеральных горизонтах. Значительное содержание ненасыщенных органических кислот обуславливает высокую гидролитическую кислотность подстилок (до 55 мг-экв./100 г почвы). Степень насыщенности основаниями верхних горизонтов низкая (28–31%). Для опытов использовали аммиачную селитру, фосфоритную муку и хлористый калий.

Таблица 57

Схема внесения удобрений в ельнике черничном,  $\text{кг} \cdot \text{га}^{-1}$

Вариант опыта	Секция «а»	Секция «б»	Секция «в»	Секция «г»
Контроль	—	—	—	—
Известь	2000	3000	4000	6000
P + известь	P90	P160	P240	P320
N + известь	N60	N120	N180	N240
NP + известь	N60P80	N120P160	N180P240	N240P320
NPK + известь	N60P80K40	N120P160K80	N180P240K120	N240P320K160
NPK	N60P80K40	N120P160K80	N180P240K120	N240P320K160

Действие удобрений на почву в ельниках проявляется уже в первый год после их внесения (Антропогенная динамика., 1992), причем в первую очередь они влияют на лесную подстилку (табл. 58). Отмечена довольно большая динамичность содержания элементов питания в почве по годам исследований после внесения удобрений. Это объясняется различной растворимостью удобрений, разными погодными условиями. Резко изменяется актуальная и обменная кислотность верхних горизонтов почвы по сравнению с контролем.

Изменение кислотности отмечено в течение всех сроков наблюдений (как в первый год после внесения удобрений, так и в последующие). Наибольшее уменьшение кислотности происходит в вариантах «известь», «известь + NPK». Реакция солевой вытяжки лесной подстилки близка к нейтральной.

В нижних же горизонтах почвы реакция почти не изменилась. Изменение кислотности положительно коррелирует с изменением содержания кальция и магния в почве.

Таблица 58

Величина кислотности и содержание элементов минерального азота в подзолах песчаных иллювиально-гумусово-железистых на морене в ельниках черничных при внесении минеральных удобрений, мг на 100 г а. с. почвы

Вариант опыта	Горизонт	pH (KCl)			pH (H <sub>2</sub> O)			NH <sub>4</sub> (1 н KCl)			NO <sub>3</sub> (гипсовая вытяжка)		
		1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
Контроль	L	4,2	3,4	3,7	5,5	5,1	5,6	11,7	8,2	12,2	Сл.	Нет	Сл.
	F	3,8	2,8	3,5	4,8	5,0	5,6	2,2	8,2	2,7	"	"	Нет
	A2	3,4	3,8	4,0	4,6	4,7	5,6	1,6	0,9	Сл.	"	"	"
	B1	4,6	4,4	4,7	5,5	5,3	5,5	1,3	1,1	"	Нет	"	"
Известь + NPK	L	7,2	6,4	6,3	7,7	6,6	6,7	16,0	11,0	10,5	2,0	"	49,3
	F	5,3	5,9	5,8	7,5	6,0	6,9	11,6	4,0	1,8	16,0	"	Сл.
	A2	3,7	3,4	3,8	5,3	4,8	6,9	4,0	Сл.	Сл.	Сл.	"	Нет
	B1	4,6	4,5	4,6	5,6	5,2	6,9	1,0	1,0	Нет	"	"	"
Известь + NP	L	7,0	6,6	6,3	7,6	8,6	6,7	21,5	7,7	10,6	15,4	Сл.	"
	F	5,8	4,2	6,4	6,6	5,8	6,7	12,9	10,0	4,1	Сл.	"	"
	A2	3,6	3,7	3,8	4,6	4,5	6,9	1,7	Сл.	Сл.	Нет	Сл.	"
	B1	4,4	4,2	4,5	4,9	4,9	6,9	1,3	1,2	"	"	Нет	"
Известь + N	L	6,4	7,3	6,2	6,9	8,4	6,6	38,3	5,3	9,0	9,9	"	Сл.
	F	5,2	6,1	6,2	6,2	7,5	6,7	36,3	5,8	8,0	28,0	"	Нет
	A2	3,6	3,6	4,6	4,7	4,5	6,7	1,6	1,1	Сл.	Нет	"	"
	B1	4,5	4,3	4,5	5,3	5,4	6,6	2,5	1,3	"	0,9	"	"
Известь + P	L	6,1	5,4	6,1	7,3	6,1	6,6	13,2	12,1	6,0	5,3	1,9	Сл.
	F	5,6	4,7	5,5	6,9	5,8	6,7	58,9	5,9	9,6	38,9	Нет	Нет
	A2	3,8	3,3	4,3	4,8	6,3	6,7	3,2	1,1	Сл.	Сл.	"	"
	B1	4,8	4,2	4,5	5,3	5,3	6,7	3,5	1,4	Сл.	0,6	1,0	"
Известь	L	6,7	6,8	6,2	7,7	8,0	6,5	11,0	17,0	11,0	17,0	Нет	19,0
	F	6,3	6,0	6,8	6,8	8,0	6,8	35,0	6,0	12,0	35,0	Сл.	Сл.
	A2	3,7	3,2	4,2	5,3	4,6	6,9	3,0	1,0	Сл.	Сл.	Нет	"
	B1	4,7	4,3	4,6	5,5	4,9	6,9	1,0	1,0	Сл.	Сл.	"	"
NPK	L	4,0	3,9	4,5	5,6	5,7	5,9	60,2	17,8	6,9	71,7	Сл.	15,0
	F	3,4	2,9	3,2	5,3	4,8	5,8	41,9	13,9	Сл.	20,9	Нет	Нет
	A2	3,2	3,5	3,3	4,4	5,2	6,2	4,7	Сл.	Сл.	1,9	"	"
	B1	4,5	4,3	4,2	4,7	5,2	6,5	2,8	1,0	0,4	2,3	"	"

Примечание. Здесь и далее: 1 — первый, 2 — второй, 3 — третий год после внесения удобрений.

Внесение мочевины с фосфорными и калийными удобрениями увеличивает содержание аммонийного азота в почвах ельников в первый год после внесения. Значительно это повышение и на вариантах с известью. Если в почвах контрольного варианта нитраты полностью отсутствовали, то внесение азотных удобрений и даже одной извести способствовало появлению их в почве.

Внесение минеральных удобрений сказывается на содержании органического вещества в почве. Особенно резко снижается количество общего углерода при внесении одной извести и извести в комплексе с минеральными удобрениями. Одновременно с изменением содержания общего углерода при внесении извести и минеральных удобрений сокращается и количество общего азота в почве (табл. 59), что можно объяснить, с одной стороны, уменьшением содержания органического вещества, с другой — переходом менее доступных форм азотных соединений в более подвижные, которые быстро расходуются растениями и микроорганизмами. Изменилось соотношение углерода к азоту в почве, особенно четко это прослеживается на второй

Таблица 59

Содержание общего углерода и азота в подзолах песчаных иллювиально-гумусово-железистых на морене в ельниках черничных, %

Вариант опыта	Горизонт	Общий углерод		Общий азот		C : N	
		1	2	1	2	1	2
Контроль	A0'	45,41	36,91	1,14	1,51	39,8	24,4
	A0"	43,91	46,27	1,79	1,55	24,5	29,8
	A2	0,32	1,07	0,07	0,07	4,6	15,0
	B1	0,17	1,61	0,04	0,10	4,2	16,1
Известь + НРК	A0'	38,88	27,08	1,04	1,05	37,3	25,1
	A0"	31,05	25,70	1,28	0,97	24,2	25,4
	A2	0,25	0,42	0,04	0,06	6,2	7,0
	B1	0,41	0,72	0,08	0,05	5,0	14,0
Известь + НР	A0'	18,33	29,62	1,21	1,03	15,1	28,7
	A0"	39,67	33,51	1,79	1,25	22,3	25,8
	A2	1,59	1,40	0,08	0,08	19,0	17,5
	B1	0,35	1,24	0,04	0,06	8,7	20,6
Известь + N	A0'	34,22	29,66	1,45	1,14	23,5	25,0
	A0"	24,54	28,91	1,03	0,91	23,8	31,7
	A2	0,41	1,04	0,04	0,05	10,2	20,8
	B1	0,53	0,73	0,06	0,04	8,8	19,5
Известь + P	A0'	—	35,08	—	1,29	—	27,3
	A0"	—	24,40	—	1,54	—	15,8
	A2	—	0,75	—	0,02	—	37,5
	B1	—	1,31	—	0,12	—	9,1
Известь	A0'	—	20,37	—	1,13	—	18,0
	A0"	—	29,03	—	1,32	—	21,9
	A2	—	0,21	—	0,05	—	4,2
	B1	—	1,10	—	0,09	—	12,2
НРК	A0'	41,80	39,53	1,76	1,59	23,7	24,8
	A0"	42,92	42,20	1,51	1,26	28,4	33,4
	A2	1,79	1,57	0,16	0,06	11,1	25,1
	B1	1,81	0,48	0,15	0,11	12,2	4,7

год после внесения удобрений. Если в верхнем горизонте подстилки на контрольном участке  $C : N = 39,8$ , то на участке «известь +  $NP$ » это соотношение равно 15,1, в опыте с  $NPK$  — 23,7.

### Химические свойства почв сосняков и минеральные удобрения

Позже приступили к изучению влияния различных доз и сроков внесения азотных удобрений на свойства подзолистых почв в сосновых лесах вересково-брусничного типа разного возраста, начиная с 15- и кончая 90–100-летними. Почвы опытных участков — иллювиально-железистые песчаные подзолы, сформировавшиеся на озерно-ледниковых отложениях. Они характеризуются высокой кислотностью ( $pH_{KCl}$  2,85–3,45), особенно нижний горизонт лесной подстилки. Наибольшее содержание азота приурочено к органогенным горизонтам, причем максимум его отмечен в нижнем слое подстилки — 1,45%, в минеральных горизонтах — лишь сотые доли процента. Общий углерод в лесных подстилках составляет 46–48%, что свидетельствует о слабой минерализации органических остатков.

Значительный интерес также представляет изучение особенностей изменения свойств почв под влиянием удобрений в разных типах леса, исследование длительности их последствий. Поэтому в течение пяти лет нами изучалось влияние азотных удобрений на свойства подзолистых и болотных почв в различных типах сосновых лесов. Минеральные азотные удобрения (аммиачная селитра) вносили на поверхность почвы в 1973 г. из расчета 140 кг, в 1974 и 1975 гг. — по 70 кг на 1 га, в 1976 г. — мочевины в дозе 250 кг действующего начала на 1 га. В последующие годы удобрения не вносили. Объектами исследований служили почвы наиболее распространенных на территории Карелии типов сосновых лесов: (А) подзолы иллювиально-железистые в сосняке брусничном 0 (0–2) — A2 (4–8) — B1 (8–30) — B2 (30–55) — BC (55–100) — C (100–220), (Б) подзолы иллювиально-гумусово-железистые в сосняке черничном 0 (0–4) — A2 (4–7) — Bhf (7–20) — Bf (20–40) — B3 (40–60) — BC (60–120) — C (120–160) и (В) торфяные переходные почвы в сосняке багульниково-сфагновом 0 (0–8) — T1 (8–26) — T2 (26–60) — T3 (60–95) — Dg (95–глубже), составляющие экологический ряд по увлажнению.

Регулярное внесение минеральных азотных удобрений (мочевины) вызывает снижение почвенной кислотности в подстилках автоморфных почв (рис. 43). В минеральных горизонтах подзолов сдвиг реакции незначителен. Кислотность торфяных почв при внесении азотных удобрений изменяется слабо, величина  $pH$  солевой вытяжки

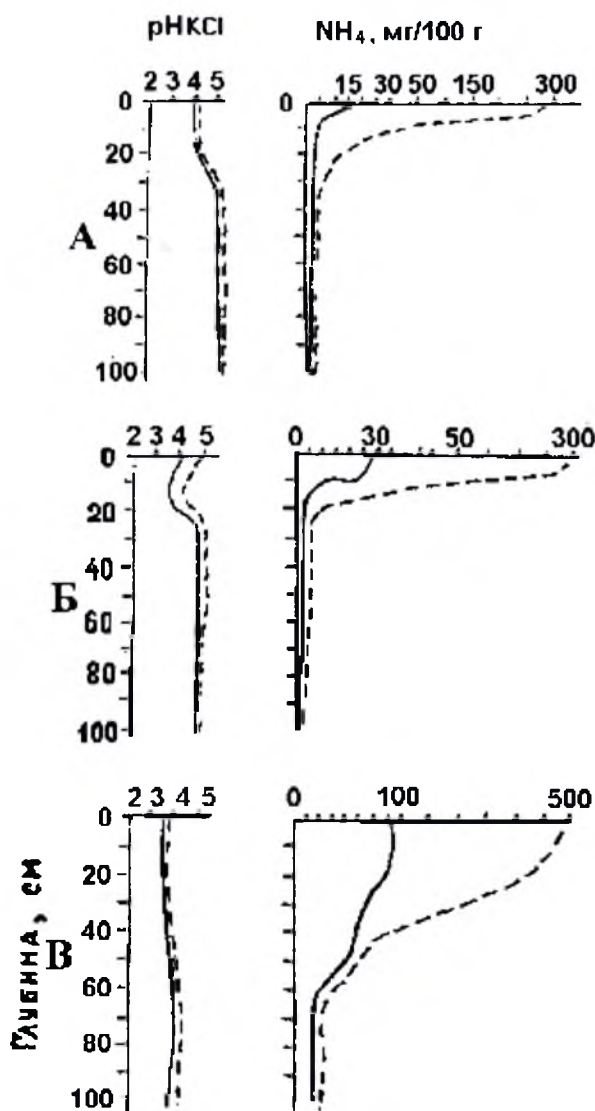


Рис. 43. Снижение кислотности в автоморфных почвах под влиянием мочевины



ниже 4,0 по всему профилю. Очевидно, при минерализации оторфованных горизонтов под действием азотных удобрений образуется большое количество ненасыщенных органических кислот, которые и подкисляют почву.

Внесение минеральных удобрений в сосновых лесах, так же как и в ельниках, оказало влияние на содержание в почвах органического вещества, причем в различных типах леса это воздействие было неодинаковым.

В сосняках вересково-брусничных удобрения вызвали обильное разрастание напочвенного растительного покрова, что, в свою очередь, способствовало накоплению органического вещества. Поэтому в данном случае не наблюдалось резкого снижения запасов общего углерода в подстилке за счет ускорения минерализации растительных остатков при внесении удобрений. В отдельные сроки содержание углерода в подстилках на удобренных вариантах было даже несколько выше, чем на контроле.

Изменение содержания общего углерода в подстилках сосняков брусничных было незначительным, а в подстилках сосняков черничных отмечено его уменьшение. Количество общего углерода возрастает в минеральных горизонтах подзолов.

В торфяных почвах сосняков багульниково-сфагновых наблюдается снижение количества общего углерода в верхних горизонтах и накопление в нижележащих (табл. 60).

При внесении азотных удобрений увеличилось содержание общего азота во всех исследуемых почвах: в подстилках сосняков брусничных и черничных и в органогенных горизонтах торфяных почв — на 30–40%. Отмечено возрастание содержания азота в минеральных горизонтах подзолов, что повышает их эффективное плодородие. Валовые запасы азота в 50-сантиметровом слое почв удобренных участков повышались по сравнению с контролем в сосняках брусничных — на 22–23, в черничных — на 20–27 и багульниково-сфагновых — на 10% (табл. 61). Это происходит в результате увеличения количества опада, обогащенного азотом, ускорения процессов минерализации растительных остатков под влиянием азотных удобрений. Об ускорении минерализации подстилки свидетельствует также сужение отношения  $C : N$ . Если до внесения удобрений в подстилках сосняков брусничных, черничных и багульниково-сфагновых оно составляло соответственно 49, 31 и 47, то после четырехлетнего внесения удобрений — 33, 27 и 34. Увеличение содержания общего азота в минеральных горизонтах лесных почв при регулярном внесении удобрений отмечают ряд исследователей (Победов, Волчков, 1969; Будниченко, 1971; Шумаков, 1972; Костылева, 1974; и др.).

Таблица 60

Влияние азотных удобрений на содержание органического вещества в почвах сосняков экологического ряда, %

Почва. Тип леса	Горизонт	Глубина, см	С			
			контроль $M_1$	удобрение $M_2$	$MD_1$	$t_1$
Подзол иллювиально-железистый песчаный на флювиогляциальных отложениях. Сосняк брусничный	L	0–1	43,81	41,32	$\pm 2,49$	1,0
	F	1–2	42,10	43,81	$\pm 1,71$	1,0
	A2	3–8	1,20	1,04	$\pm 1,04$	4,0
	Bf	8–30	0,93	0,60	$\pm 0,11$	3,0
	B2	30–55	0,18	0,21	$\pm 0,01$	3,0
Подзол иллювиально-гумусово-железистый песчаный на флювиогляциальных отложениях. Сосняк черничный свежий	L	0–2	49,45	45,71	$\pm 1,35$	2,9
	F	2–4	43,46	36,82	$\pm 0,96$	6,9
	A2	4–10	1,11	2,61	$\pm 0,39$	3,9
	Bhf	10–20	1,25	2,44	$\pm 0,17$	7,0
	Bf	20–40	0,45	1,90	$\pm 0,35$	4,1
Торфяная переходная. Сосняк багульниково-сфагновый	OT1	0–4	58,00	52,40	$\pm 2,45$	2,3
	A0T2	4–8	46,70	48,00	$\pm 0,25$	5,0
	T1	8–26	47,50	51,80	$\pm 1,25$	3,4
	T2	26–53	26,53	40,00	$\pm 3,37$	2,5

Примечание.  $t_1$  – достоверность разности между средними  $M_1$  и  $M_2$ ; критическое значение  $t = 2,92$ ,  $P = 0,05$  (Оуэн, 1973).

С внесением азотных удобрений повысилось содержание аммонийного азота во всех почвах: в подстилках сосняков брусничных в год внесения удобрений – в 21 раз, черничных – в 12 и в багульниково-сфагновых – в 19 раз. В нижележащих горизонтах подзолов увеличение содержания аммонийного азота было менее значительным, однако это очень важно для почв с низкой степенью биологической активности (табл. 62).

В год внесения удобрений влияние их на содержание аммонийного азота в почве высокослабо (данные дисперсионного анализа) (табл. 63). На следующий год действие удобрений снижается, а еще через два года количество аммония в почвах удобренных участков сравнялось с контролем.

Нитратный азот в исследуемых почвах содержится в очень малых количествах и приурочен, в основном, к органогенным горизонтам (1,1–1,8 мг на 100 г). Внесение азотных удобрений значительно слабее сказалось на содержании нитратного азота, чем аммонийного. В год внесения удобрений отмечено увеличение его количества в подстилках до 2–3 мг на 100 г. Однако статистическая обработка

Таблица 61

Влияние азотных удобрений на содержание общего азота в почвах сосняков экологического ряда по увлажнению, %

Тип леса. Почва	Горизонт, глубина, см	Контроль (без удобрений) ( $M_1$ )	Удобрённые участки					
			1976 ( $M_2$ )	$m_{D1}$	$t_1$	1977 ( $M_3$ )	$m_{D2}$	$t_2$
Сосняк бруснич- ный. Подзол иллюви- ально-желези- стый песчаный на флювиогля- циальных отло- жениях	L 0–1	0,850	1,202	$\pm 0,089$	3,96	1,130	$\pm 0,071$	1,0
	F 1–3	0,910	1,385	$\pm 0,117$	4,06	1,384	$\pm 0,050$	0,02
	A2 3–8	0,050	0,066	$\pm 0,0052$	3,08	0,057	$\pm 0,006$	1,61
	Bf 8–30	0,026	0,026	—	—	0,029	$\pm 0,002$	2,00
	B2 30–55	0,024	0,027	$\pm 0,002$	1,58	0,027	—	—
	BC 55–100	0,010	0,021	$\pm 0,004$	2,75	0,022	$\pm 0,002$	0,59
	C 100–110	0,011	0,017	$\pm 0,003$	2,00	0,011	$\pm 0,002$	2,86
Сосняк чернич- ный. Подзол иллюви- ально-гумусово- железистый песчаный на флювиогляци- альных отложе- ниях	L 0–2	1,238	1,597	$\pm 0,082$	4,33	1,508	$\pm 0,089$	1,00
	F 0–4	1,358	1,410	$\pm 0,022$	2,36	1,438	$\pm 0,028$	1,00
	A2 4–10	0,075	0,105	$\pm 0,0052$	5,77	0,107	$\pm 0,002$	1,00
	Bhf 10–20	0,050	0,064	$\pm 0,0055$	2,55	0,078	$\pm 0,007$	2,00
	Bf 20–40	0,022	0,022	—	—	0,026	$\pm 0,004$	1,00
	B3 40–60	0,017	0,023	$\pm 0,0048$	1,25	0,023	—	—
	BC 60–100	0,014	0,026	$\pm 0,0037$	3,24	0,021	$\pm 0,003$	1,67
Сосняк багульниково- сфагновый. Торфяная пере- ходная	C 100–120	0,014	0,014	—	—	0,014	—	—
	OT1 0–4	1,051	1,476	$\pm 0,148$	2,87	1,425	$\pm 0,045$	1,13
	OT2 4–8	0,987	1,394	$\pm 0,093$	4,38	1,365	$\pm 0,046$	0,63
	T1 8–26	1,609	1,769	$\pm 0,073$	2,19	1,607	$\pm 0,088$	1,85
	T2 26–53	0,784	0,848	$\pm 0,083$	0,77	0,864	$\pm 0,056$	0,29
	Dg 53 и глубже	0,077	0,110	$\pm 0,015$	2,20	0,107	$\pm 0,003$	1,15

Примечание.  $t_1$  — достоверность разности между средними  $M_1$  и  $M_2$ ,  $t_2$  — между  $M_2$  и  $M_3$ ; критическое значение  $t = 2,92$ ,  $P = 0,05$  (Оуэн, 1973, с. 28–30).

данных показала, что различия между содержанием нитратов на контрольных и удобрённых участках незначимы.

В год внесения азотных удобрений возросло содержание в почвах гидролизуемого азота (табл. 64), особенно в лесной подстилке и горизонте A2, в сосняке брусничном — в 4,4, черничном — в 4,7 и багульниково-сфагновом — в 5,9 раза. На следующий год содержание в почвах щелочногидролизуемого азота уменьшилось, но превышало количество его на контроле в 1,5–2 раза.

В минеральных горизонтах подзолов количество щелочногидролизуемого азота уменьшилось и приблизилось к контролю, оставаясь все же довольно высоким в горизонтах, прилегающих к подстилке. Увеличение количества в почвах гидролизуемого азота произошло,

Таблица 62

Влияние азотных удобрений на содержание аммонийного азота в почвах сосняков экологического ряда, мг на 100 г а. с. почвы

Тип леса. Почва	Горизонт, глубина, см	Год внесения		После внесения удобрений					
		кон-троль	удоб-рение	I год		II год		III год	
				кон-троль	удоб-рение	кон-троль	удоб-рение	кон-троль	удоб-рение
Сосняк бруснич-ный. Подзол иллювиально-железистый пес-чаный на флювио-гляциальных отложениях	L 0—1	13,7	279	18,9	28,4	8,3	13	29	37
	F 1—3	12,5	271	19,5	31,7	15	17	25	32
	A2 3—8	0,7	35,1	0,9	6,4	1,4	1,5	3,1	6,0
	Bf 8—30	1,0	2,3	0,9	1,0	0,9	1,3	2,8	3,2
	B2 30—55	1,2	1,6	1,0	0,6	1,1	1,2	2,3	2,5
Сосняк чернич-ный свежий. Под-зол иллювиально-гумусово-желези-стый песчаный на флювиогляциаль-ных отложениях	L 0—2	26,8	333	19,7	36,2	18	45	31	28
	F 2—4	22,3	251	21,5	44,5	24	26	40	31
	A2 4—10	0,9	8,7	2,6	9,9	3,1	1,6	4,2	5,6
	Bhf 10—20	1,1	7,7	1,4	2,1	2,2	1,6	3,4	2,8
	Bf 20—40	1,1	1,6	1,6	1,0	1,9	1,0	2,5	2,3
Сосняк багульни-ково-сфагновый. Торфяная пере-ходная	OT 1 0—4	25,0	634	45,1	197	31	45	71	63
	OT 2 4—8	35,3	486	31,7	77,3	63	58	51	53
	T 1 8—26	26,7	51,3	26,	36,3	42	30	42	70
	T 2 26—53	8,7	23,9	16,9	17,6	37	40	50	55

Таблица 63

Трехфакторный дисперсионный анализ содержания в почвах азота (рассматривается действие фактора «удобрение»)

	Аммонийный азот				Нитратный азот		Щелочногидроли-зуемый азот	
	Год вне-сения удобре-ний	Год последствий			Год вне-сения удобре-ний	I год после-дейст-вия	Год вне-сения удобре-ний	I год после-дейст-вия
		1	2	3				
Дисперсионное отношение (F)	126,44	6,73	0,95	1,01	2,71	3,26	163,03	5,44
Табличное F 0,975	5,28	5,15	5,28	5,28	5,28	5,15	5,28	5,28
Сила влияния (h, %)	20,00	3,00	0,01	0,01	1,70	1,80	16,10	3,30

Таблица 64

Влияние азотных удобрений на содержание в почвах щелочногидролизуемого азота по Корнфилду, мг на 100 г а. с. почвы

Тип леса. Почва	Горизонт, глубина, см	Год внесения удобрений		1 год последствия	
		контроль	удобренный вариант	контроль	удобренный вариант
Сосняк бруснич- ный. Подзол ил- лювиально-желе- зистый песчаный на флювиогля- циальных отло- жениях	L 0–1	72,2	291	54,8	94,0
	F 1–3	63,7	312	58,9	92,8
	A2 3–8	6,9	45,1	4,9	11,4
	Bf 8–30	3,7	5,5	3,4	3,2
	B2 30–55	2,3	3,1	1,9	1,3
	BC 55–100	1,6	1,6	1,2	1,6
	C 100–110	1,7	1,7	1,2	1,6
Сосняк чернич- ный. Подзол ил- лювиально-гуму- сово-железистый песчаный на флювиогляциаль- ных отложениях	L 0–2	89,4	370	82,4	120
	F 2–4	58,6	327	88,9	143
	A2 4–10	6,9	13,8	7,2	19,4
	Bhf 10–20	6,3	8,7	6,5	8,1
	Bf 20–40	2,5	4,0	2,3	1,7
	B3 40–60	2,7	2,8	1,7	1,3
	BC 60–100	1,6	2,0	1,5	2,1
Сосняк багульни- ково-сфагновый. Торфяная переходная	C 100–110	1,5	1,5	2,5	2,4
	OT1 0–4	136,3	707	71,7	203
	OT2 4–8	84,7	583	57,1	119
	T1 8–26	97,0	103	97,4	94,3
	T2 26–53	48,1	75,3	77,5	77,4
	Dg 53 и глубже	6,9	11,8	3,8	5,3

в основном, за счет аммиачного азота удобрений (превращение мочевины идет до стадии аммиака) и в значительно меньшей степени в результате мобилизации под влиянием удобрений органических азотсодержащих соединений самой почвы. Дисперсионный анализ данных содержания щелочногидролизуемого азота в почвах показал, что влияние удобрения высокославно в год внесения, на следующий год действие его ослабевает.

В целом можно отметить, что изменение количества лабильного азота под влиянием минеральных азотных удобрений охватывает верхнюю 30-сантиметровую толщу лесных почв.

Различные сроки внесения мочевины по-разному сказываются на количестве минерального азота в почве. Внесение азотных удобрений ранней осенью приводит к устойчивой фиксации аммонийного азота почвой в условиях пониженных температур. Высокое содержание аммония в почве отмечено при внесении мочевины в декабре – январе по снежному покрову. Чем выше доза мочевины,

тем больше в почве аммонийного азота, особенно в лесной подстилке.

Применение минеральных азотных удобрений изменяет соотношение фракций азотных соединений в составе азотного фонда 50-сантиметрового слоя почвы (см. табл. 61). В подзолах сосняков брусничных относительное содержание минерального и гидролизуемого азота возросло до 17 и 25%, в подзолах сосняков черничных — до 13 и 15% соответственно. Количество негидролизуемого азота снизилось соответственно до 75 и 85%. В торфяных почвах сосняков багульниково-сфагновых относительное содержание минерального азота возросло до 5,7, а щелочногидролизуемого — до 10,6% от общего, содержание негидролизуемых форм уменьшилось до 89,2%. В торфяных почвах увеличение относительного содержания минерального и гидролизуемого азота и снижение количества негидролизуемого азота было менее значительным, чем в подзолах, что свидетельствует о меньшей подвижности органических азотсодержащих соединений этих почв по сравнению с подзолами. Лабораторный опыт по изучению интенсивности процессов аммонификации и нитрификации в удобренных почвах показал, что интенсивность нитрификации возросла в подстилках в 1,5–2,0 раза, а аммонификации — в 7–8 раз. Процессы аммонификации и нитрификации были более интенсивными, чем на контроле, и в минеральных горизонтах подзолов, что связано с активизацией микробиологической деятельности в почве, а также с возможностью мобилизации почвенного азота под действием удобрений (табл. 65).

Анализ вод, поступивших в лизиметры в течение вегетационного периода на третий год после внесения удобрений, выявил значительную миграцию химических элементов с почвенным раствором, а также изменение кислотности в нижних горизонтах почвы (табл. 66). Так, кислотность почвенного раствора иллювиального горизонта на контрольном участке была значительно выше (рН 6,5), чем в варианте с известью (рН 7,2). Лизиметрические растворы на удобренных площадках содержали намного больше аммиачного азота; нитратный азот в растворах на контрольных участках без удобрений отсутствовал, тогда как в растворах вариантов «известь» и «известь + NPK» он обнаружен, намного выше здесь количество щелочноземельных металлов.

Повышение содержания химических элементов в нижних горизонтах почвы В1 и В2 подтверждает наличие миграции химических элементов на большую глубину в почвенном профиле, что не всегда удастся проследить на основании определения водорастворимых элементов из самих почвенных образцов.



Таблица 65

Аммонифицирующая и нитрифицирующая способность почв сосняков при внесении минеральных азотных удобрений (лабораторный опыт), мг на 100 г а. с. почвы

Тип леса. Почва	Горизонт, глубина, см	Содержание N-NH <sub>4</sub>			Содержание N-NO <sub>3</sub>		
		до компос- тирования	через 14 дней	разница	до компос- тирования	через 14 дней	разница
Сосняк брусничный. Подзол иллювиально-железистый песчаный на флювиогляциальных отложениях	L 0–1	146,0	203,5	57,5	2,15	5,90	3,75
	F 1–3	107,4	178,1	70,7	1,27	7,73	6,46
	A2 3–8	16,4	16,8	0,4	0,19	0,54	0,35
	Bf 8–30	4,1	4,1	—	0,10	0,23	0,13
	B2 30–55	2,6	2,7	0,1	0,18	0,18	—
	BC 55–100	1,2	1,2	—	0,10	0,19	0,09
	C 100–110	1,5	1,5	—	0,09	0,23	0,14
Сосняк черничный свежий. Подзол иллювиально-гумусово- железистый песчаный на флювиогляциальных отложениях	L 0–2	134,0	233,6	99,6	2,64	7,32	4,68
	F 2–4	126,0	187,1	61,1	1,74	1,92	0,18
	A2 4–10	7,0	16,8	9,8	0,18	0,52	0,34
	Bhf 10–20	3,9	7,9	4,0	0,16	0,38	0,22
	Bf 20–40	2,5	2,8	0,3	0,11	0,14	0,03
	B3 40–60	2,2	2,7	0,5	0,09	0,14	0,05
	BC 60–100	1,5	1,7	0,2	0,09	0,14	0,05
Сосняк багульниково-сфагновый. Торфяная переходная	OT1 0–4	360,0	820,6	460,6	1,72	14,60	12,88
	OT2 4–8	282,2	528,7	246,5	1,33	15,60	14,27
	T1 8–26	40,6	47,2	6,6	1,08	2,35	1,27
	T2 26–53	23,3	32,3	9,0	0,72	1,54	0,82
	Dg 53 и глубже	5,2	6,0	0,8	0,16	0,16	—

Таблица 66

Химический состав лизиметрических растворов через три года после внесения удобрений (подзол иллювиально-гумусово-железистый песчаный на морене в ельнике черничном)

Вариант опыта	Горизонт	pH		NH <sub>4</sub>		NO <sub>3</sub>		K				Ca		Mg	
		V	VI	V	IX	V	VI	V	IX	VI	IX	V	IX	V	IX
Контроль	A0	—	6,6	—	Сл.	—	Нет	—	3,7	6,5	—	—	—	—	—
	A2	4,5	—	2,3	—	Нет	—	1,5	—	—	6,6	—	—	3,5	—
Известь + NPK	B1	6,5	—	2,1	—	Нет	—	0,9	0,4	—	8,8	—	1,2	3,5	—
	A0	7,0	—	13,6	—	6,1	Нет	5,8	4,2	—	—	—	—	—	—
Известь	B1	—	6,9	2,5	—	—	—	—	3,7	—	—	Нет	—	—	—
	A2	7,2	—	17,2	—	—	—	2,8	—	7,9	12,8	—	—	6,6	—
	B1	7,3	6,9	2,1	—	8,8	—	3,6	2,6	—	20,6	5,8	6,2	5,3	—
	B2	—	7,2	—	—	10,2	—	—	2,8	—	16,3	—	12,3	—	—

### Влияние минеральных удобрений на биологическую активность почв

Численность и состав почвенной микрофлоры в таежных экосистемах определяется мощностью лесной подстилки и режимом влажности почв. Лесные подстилки под сосняком черничным наиболее богаты микроорганизмами: их общая численность  $14,5 \text{ млн} \cdot \text{г}^{-1}$ , в сосняке вересково-лишайниковом и багульниково-сфагновом —  $5,4$  и  $5,1$  соответственно. Биогенность горизонта A2 ниже в 6–12 раз. Видовой состав и численность отдельных групп микроорганизмов тесно связаны с погодными особенностями года исследования. Внесение минеральных азотных удобрений вызывает устойчивое, но небольшое увеличение численности микроорганизмов в подстилках. В меньшей степени реагируют на удобрение микромицеты, а также олиготрофы и актиномицеты (табл. 67).

Положительное воздействие удобрений на развитие микроорганизмов азотного цикла, особенно потребителей минерального азота, в сосняках на подзолистых почвах сохраняется три года, в оторфованной подстилке оно максимально на второй год. Активизация микроорганизмов углеродного цикла невысока. Удобрение оказывает угнетающее действие на биодеструкцию клетчатки при неблагоприятных условиях — пересыхании подстилки, а также при ее переувлажнении

Таблица 67

Биогенность лесной подстилки разных типов леса, средние данные за вегетационные периоды трех лет, число клеток в грамме а. с. почвы

Тип леса	Общее кол-во эвтрофных микроорганизмов				Олиготрофы, $\times 10^6$	Аэробные целлюлозоразрушители		Кэф. минерализации
	Абс. кол-во, $\times 10^6$	Отн. кол-во, %				Абс. кол-во, $\times 10^3$	Энергия разрушения клетчатки, %/мес.	
		бак-терии	грибы	спор. формы				
Сосняк вересковый	6,3	84,1	15,9	20,4	5,6	86,0	6,1	0,9
	11,6	94,8	5,2	23,2	5,8	189,0	6,5	1,2
Сосняк черничный влажный	15,6	92,7	7,3	13,5	85,5	174,2	7,0	1,7
	22,0	94,5	5,5	23,2	101,0	402,8	9,5	2,6
Сосняк багульниково-сфагновый	6,0	85,0	15,0	15,1	11,8	329,0	5,9	3,3
	16,9	92,8	8,0	15,7	22,4	850,0	7,3	4,0

*Примечание.* В числителе — контроль, в знаменателе — опыт (удобрение). Споровые формы — процент от общего числа бактерий.

и ухудшении аэрации, что снижает общий эффект от удобрений. Более отзывчива на удобрения микрофлора подстилки в сосняке черничном. Внесение дополнительного азота способствует здесь существенному усилению функциональной роли активных разрушителей клетчатки — миксобактерий (от 50 до 80%). По итогам трехлетних наблюдений удалось установить, что под воздействием удобрений происходит ускорение процессов минерализации органического вещества, в том числе деструкции клетчатки.

**Влияние минеральных удобрений на некоторые показатели продуктивности лесных биогеоценозов**

Внесение минеральных удобрений в лесу вызывает изменение общих запасов лесных подстилок. Особенно существенные изменения в еловых лесах наблюдаются при совместном внесении извести и фосфорно-калийных удобрений, а также комплекса азотных, фосфорных и калийных. Увеличение запасов подстилки может достигать 5–8 т · га<sup>-1</sup> (табл. 68). Изменяется соотношение верхнего и нижнего горизонтов подстилки за счет увеличения мощности нижнего подгоризонта.

Внесение извести вызывает угнетение зеленых мхов, в некоторых случаях происходит их отмирание. Полный комплекс удобрений (NPK) без извести способствует увеличению запаса нижнего

Таблица 68

Общий запас лесной подстилки по вариантам опыта с удобрениями в ельнике черничном, т · га<sup>-1</sup>

Вариант опыта	Горизонт	Запас	Общий запас
Контроль	L F	5,5 14,2	19,7
Известь + NPK	L F	8,6 10,8	19,4
Известь + NP	L F	5,6 14,9	20,5
Известь + N	L F	5,3 13,8	19,1
Известь + PK	L F	7,5 16,5	24,0
NPK	L F	7,1 20,6	27,6
Известь	L F	6,6 19,9	26,5

питания и в конечном счете приводят к изменениям в ассимиляционном аппарате и к увеличению прироста древесины. Основным в механизме влияния удобрений на прирост является изменение содержания

Таблица 69

Содержание азота в полуразложившихся компонентах подстилки через три года после внесения удобрений (сосняк вересково-брусничный, 47 лет), %

Компоненты подстилки	Контроль без удобрений	Мочевина, 100 кг на га д. в.
Лишайники	0,63	0,78
Зеленые мхи	1,04	1,72
Кукушкин лен	1,08	1,47
Хвоя	0,88	0,98
Кора, чешуя	1,02	1,13
Веточки сосны	0,94	1,15
Листья брусники	1,01	0,97
Листья толокнянки	—	1,57
Мелочь	0,92	1,15

подгоризонта подстилки при некотором уменьшении мощности полуразложившейся верхней части. За счет обильного развития разнотравья и кустарничковой растительности при внесении извести и NPK увеличивается запас верхнего подгоризонта подстилки. Среди химических элементов по степени аккумуляции в лесной подстилке на первом месте стоит азот. Внесение мочевины вызывает существенные изменения его валового содержания в растительных остатках (табл. 69).

Продуктивность насаждений тесно связана с развитием ассимиляционного аппарата деревьев, недостаток питания является причиной слабой охвоенности деревьев, развития короткой желтовато-зеленой хвои с пониженным содержанием в ней зольных элементов и азота. Вносимые в почву азотные удобрения улучшают снабжение деревьев элементами

питания и увеличение ее веса.

При внесении полного комплекса минеральных удобрений (NPK) по фону извести содержание азота в хвое ели увеличивается в 2 раза (0,85% на контроле; 1,91% — на удобренном варианте). Внесение азотных удобрений в средневозрастных сосняках приводит к увеличению содержания общего и белкового азота в хвое всех типов леса (табл. 70). Однако в первый же год после внесения удобрений количество азота

Таблица 70

Влияние азотных удобрений на содержание азота в однолетней хвое сосны  
(первый год последствия)

Тип леса	Общий азот		Белковый азот		Небелковый азот	
	мг на 100 г	%	мг на 100 г	%	мг на 100 г	%
Сосняк брусничный	1792	1,79	1738	96,9	54	3,1
	1348	1,35	1346	99,8	2	0,2
Сосняк черничный	1947	1,95	1891	97,1	56	2,9
	1738	1,74	1738	100	0	0
Сосняк багульниково-сфагновый	1414	1,41	1377	97,4	3,7	2,6
	1269	1,27	1258	99,1	11	0,9

Примечание. В числителе — опыт, в знаменателе — контроль без удобрений.

в хвое снижается, но остается повышенным по сравнению с контролем. Наибольшее накопление азота в хвое происходит в наиболее бедном сосняке брусничном.

На второй год последствия азотных удобрений происходит значительное увеличение прироста стволовой древесины. Ее текущий прирост (в коре) в сосняке брусничном на участке без удобрений составил 5,1, а на удобренном — 10,0 м<sup>3</sup> на 1 га, т. е. увеличился на 96%. В сосняке черничном свежем текущий прирост древесины составил на контроле 8,5, а на удобренном участке 10,2 м<sup>3</sup> на 1 га, т. е. увеличился на 20%. Самым низким прирост стволовой древесины был в сосняке багульниково-сфагновом — 2,4 м<sup>3</sup> на 1 га как на контрольном варианте, так и с внесением азотных удобрений. Определены величины дополнительного прироста стволовой древесины в сосновых древостоях при внесении различных доз азотных удобрений (табл. 71).

Рассчитаны показатели дополнительного прироста древесины в средневозрастных ельниках черничных при внесении различных

Таблица 71

Дополнительный прирост стволовой древесины в сосновых древостоях при внесении азотных удобрений

Доза удобрений, кг/га	Возраст древостоев, лет (числитель), и относительный прирост древесины, % (знаменатель)						
	20 57	40 91	60 100	80 92	100 77	120 61	140 46
50	1,6	2,6	2,8	2,6	2,2	1,7	1,3
100	3,5	5,6	6,2	5,7	4,8	3,8	2,9
150	5,6	9,0	9,9	9,1	7,6	6,0	4,6
200	7,8	12,4	13,6	12,5	10,5	8,3	6,3
250	9,8	15,6	17,2	15,8	13,2	10,6	7,9
300	11,6	18,6	20,4	18,8	15,7	12,5	7,1

сочетаний доз минеральных удобрений (табл. 72) (Казимиров и др., 1991). Наибольшую прибавку древесины дает внесение азотных и фосфорных удобрений по фону извести, затем — внесение полного минерального удобрения. Применение удобрений, не включающих азотные, дает прибавку стволовой древесины в значительно меньшей степени.

Таблица 72

Прирост древесины в расчете на 1 га в ельнике черничном II класса возраста

Вариант	До удобрения		После удобрения			
			1-й год		2-й год	
	м <sup>3</sup>	%	м <sup>3</sup>	%	м <sup>3</sup>	%
Контроль	5,1	100	5,7	112	6,1	120
Известь 4 т	5,3	100	6,7	126	8,0	151
P <sub>100</sub> + известь 2 т	4,8	100	6,2	129	7,4	154
P <sub>150</sub> + известь 2 т	4,6	100	6,6	144	8,2	178
N <sub>150</sub> P <sub>100</sub> + известь 2 т	4,9	100	8,4	171	9,6	196
N <sub>150</sub> P <sub>100</sub> K <sub>100</sub>	4/1	100	6/0	146	7,8	190

### В ы в о д ы

Под влиянием минеральных удобрений происходят существенные изменения свойств песчаных иллювиально-железистых и иллювиально-гумусово-железистых подзолов и торфяных почв в сосновых и еловых насаждениях.

Внесение комплекса минеральных удобрений (NPK) и извести существенно изменяет реакцию почвенного раствора подстилок в сторону уменьшения кислотности. В минеральных горизонтах эти изменения выражены слабо.

При многолетнем внесении азотных удобрений (мочевины) также снижается обменная кислотность в верхних горизонтах автоморфных почв. В торфяных почвах кислотность уменьшается незначительно.

Минеральные азотные удобрения способствуют увеличению валовых запасов азота в корнеобитаемом слое почв (на 10–23%). Возрастание содержания общего азота в почвах происходит за счет обогащения азотом увеличившейся массы опада древесной растительности и напочвенного покрова.

Возрастает активность биогенных процессов в почве, усиливаются процессы минерализации органических азотсодержащих соединений.

Под воздействием минеральных азотных удобрений увеличиваются запасы аммонийного и нитратного азота в верхнем 50-сантиметровом слое почв. Существенное накопление подвижного азота отмечается в верхнем 20–30-сантиметровом слое. Относительное содержание негидролизующего азота в составе азотного фонда почв уменьшается.



Увеличивается аммонифицирующая и нитрифицирующая способность почв. Чем выше вносимая с минеральными удобрениями доза азота, тем значительнее возрастание количества аммония в почве.

Влияние азотных удобрений на азотный фонд песчаных подзолов прослеживается в течение двух лет. На третий год количество минерального и гидролизующего азота в почвах выравнивается с контролем. В подзолах изменения азотного фонда более существенны, чем в торфяных почвах.

Внесение извести, а также комплекса удобрений с известью способствует увеличению содержания как аммиачных, так и нитратных соединений азота в почве.

Азотные удобрения увеличивают содержание в хвое общего и белкового азота. Прирост стволовой древесины возрастает в сосновых насаждениях с нормальным увлажнением почвы при внесении азотных удобрений от 20 до 100%. В еловых насаждениях наибольший прирост древесины получен при внесении комплекса удобрений с известью. Наличие азотных удобрений в составе комплекса дает оптимальный результат (до 96% прироста). В переувлажненных сосняках минеральные азотные удобрения неэффективны.

В целом азотные удобрения увеличивают запас фитомассы насаждений и обогащают ее азотом.

### **8.3. Изменение свойств лесных почв в процессе сельскохозяйственного использования**

Болотно-подзолистые почвы, не уступая по потенциальному плодородию подзолистым почвам, имеют ряд преимуществ: они обычно залегают на равнинных участках, составляющих крупные массивы, некаменистые, удобные в использовании и обработке. В результате осушения практически прекращается процесс их заболачивания. Болотно-подзолистые почвы составляют 35% пахотных земель Карелии, причем в некоторых районах они распространены еще более широко и занимают в Питкярантском районе 51, в Олонецком — 76%. По механическому составу пахотные болотно-подзолистые почвы преимущественно суглинистые. Пахотный слой создан за счет перегнойно-аккумулятивного, нижележащего подзолистого, а иногда и иллювиального горизонтов. При обработке торфянисто-подзолисто-глеевых почв органогенный горизонт перемешивается с нижележащим минеральным, поэтому пахотных подзолисто-глеевых почв с торфяным и торфянистым горизонтами всего около 2%. В естественном состоянии болотно-подзолистые почвы отличаются высокой кислотностью, вынос кальция из них значительно выше, чем из подзолистых почв.

Поэтому, несмотря на то что мелиорированные земли, как правило, известкуются, кислотность их продолжает оставаться высокой.

Почвы Карелии в большинстве своем имеют низкое естественное плодородие, использование их под пашню возможно только после проведения комплекса работ по окультуриванию, известкованию, внесению органических удобрений (Морозова и др., 1981).

Проводилось изучение содержания различных форм азотных соединений в дерново-слабоподзолистых суглинистых глеевых почвах на ленточных глинах. В качестве экспериментального был выбран участок площадью около 60 га. Исследования проводились на посевах многолетних злаковых трав. Ежегодно под многолетние травы вносятся минеральные удобрения в дозах  $N_{110}P_{30}K_{100}$ . До осушения на территории сформировались: подзолисто-глеевые, торфяно-глеевые и торфяные почвы с мощностью торфяной залежи, достигающей местами 80 см. Участок дважды подвергался мелиорации системой открытых каналов и закрытым дренажем. В результате уровень грунтовых вод понизился, но в периоды с большим количеством осадков он поднимался до 20 см от поверхности почвы или выходил на поверхность (Володин, Чесноков, 1986).

Для анализа взяты почвенные образцы из разрезов, наиболее типичных для изучаемых почв, на пашне, а также на участке леса, не подвергавшемся мелиорации. В почвенных образцах определяли агрохимические показатели и фракционный состав азотных соединений.

Почвенный покров исследуемого участка пашни под многолетними травами представлен, в основном, дерново-слабоподзолистыми суглинистыми глеевыми почвами. В понижениях рельефа, а также на участке леса почвы торфянисто-подзолисто-глеевые.

Проведенная осушительная мелиорация и обработка привели к изменению морфологического строения почв, образовался пахотный горизонт мощностью 24–25 см (разрезы 2 и 3). Сравнивая агрохимические показатели почв в разрезах, заложенных на пашне и в лесу, можно отметить значительное снижение кислотности под влиянием окультуривания (табл. 73). Существенно различаются такие показатели, как гидролитическая кислотность и степень насыщенности основаниями.

Гидролитическая кислотность во много раз ниже, а степень насыщенности основаниями выше на окультуренных почвах по сравнению с лесной и составляют соответственно для лесной почвы 78,0 мг-экв. на 100 г и 8,2%, для пашни — 2,9–5,4 мг-экв. на 100 г и 80–89,1%. Содержание гумуса в верхних горизонтах торфянисто-подзолисто-глеевых почв превышает количество его в дерново-слабоподзолистых. Для горизонтов 0 и Т1 лесной почвы этот показатель составляет 62,5 и 14,2%, для аналогичной почвы на пашне — 8,1, а для дерново-слабо-

подзолистой — 2,3%. Содержание гумуса уменьшается в результате проведения мелиоративных работ и обработки почвы, что в значительной степени связано с перемешиванием органогенных и минеральных горизонтов и деструкцией органического вещества в лучших условиях аэрации.

Количество подвижных соединений фосфора и калия в органогенных горизонтах лесной почвы довольно высокое и составляет соответственно 25–33 и 49,3 мг на 100 г. Содержание фосфора в почве под многолетними травами колеблется от 11,2 до 22,8 мг, а калия — от 9,6 до 14,9 мг на 100 г, что свидетельствует о высокой обеспеченности фосфором и средней — калием.

Таблица 73

Агрохимическая характеристика почв

Почва	Горизонт, глубина, см	pH (KCl)	ГК	S	V	Гумус	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	K <sub>2</sub> O
			мг-экв. на 100 г			%	мг на 100 г	
Торфянисто-подзолисто-глеевая суглинистая на ленточных глинах (лес)	0 0–4	3,4	78,0	7,0	8,2	62,5	25,7	49,3
	T1 4–16	4,9	—	4,0	—	14,2	35,2	4,4
	A2 16–21	3,0	18,4	4,7	20,0	5,9	3,7	13,3
	Bg 21–54	4,8	2,7	18,5	87,4	0,9	6,2	4,8
	Cg 54–100	5,5	17,3	21,3	72,5	0,6	13,7	12,1
Торфянисто-подзолисто-глеевая суглинистая на ленточных глинах (пашня)	Апах. 0–24	5,3	5,4	22,6	80,0	8,1	11,2	14,9
	A2B 24–45	5,0	7,0	—	—	2,1	5,4	6,8
	Bg 45–66	4,6	1,2	—	—	2,0	9,7	13,4
	Cg 66–100	5,2	0,9	17,3	95,0	0,98	8,2	7,8
Дерново-слабоподзолистая глееватая суглинистая на ленточных глинах (пашня)	Апах. 0–25	5,5	2,9	24,4	89,1	2,3	22,8	9,6
	A2B 25–42	5,4	2,8	23,1	89,1	2,1	5,4	6,8
	Bg 42–60	5,1	1,2	18,0	80,3	1,2	18,7	6,1
	Cg 60–100	5,1	2,1	22,6	91,6	0,35	6,3	18,2

Содержание общего азота в почвах тесно связано с количеством органического вещества (Федорен, 1979), что прослеживается при сравнении почв между собой и при профильном его распределении в каждой почве. Наибольшее количество азота отмечено в верхних органогенных горизонтах лесной почвы (1,2–0,71%). В пахотном горизонте торфянисто-подзолисто-глеевой мелиорированной почвы содержание общего азота составляет 0,405, а в дерново-слабоподзолистой глееватой — 0,135%. Таким образом, по мере снижения уровня увлажненности и уменьшения содержания органического вещества количество общего азота в почве снижается. Изучение профильного распределения содержания азота в почве показало уменьшение его содержания с глубиной (табл. 74).

Таблица 74

## Содержание азота в почвах

Почва	Горизонт, глубина, см	Азот общий, %	Щелочногидролизуемый азот, мг на 100 г		
			NH <sub>4</sub>	собственно гидролизуемый	сумма
Торфянисто-подзолисто-глеевая суглинистая на ленточной глине (лес)	0 0–4	1,200	17,2	8,6	25,8
	T1 4–16	0,712	11,6	10,2	21,8
	A2 16–21	0,290	2,7	6,0	8,7
	Bg 21–54	0,095	2,5	1,7	4,2
	Cg 54–100	0,030	2,3	0,5	2,8
Торфянисто-подзолисто-глеевая суглинистая на ленточной глине (пашня)	A <sub>пах</sub> 0–24	0,405	3,5	23,4	26,9
	A2B 24–45	0,290	7,9	He опр.	He опр.
	Bg 45–66	0,100	3,0	"	"
	Cg 66–100	0,099	1,7	"	"
Дерново-слабоподзолистая глееватая суглинистая на ленточной глине	A <sub>пах</sub> 0–25	0,135	2,8	24,3	26,1
	A2B 25–42	0,105	2,3	He опр.	He опр.
	Bg 42–60	0,060	2,1	"	"
	Cg 60–100	0,070	1,3	"	"

Количество щелочногидролизуемого азота, определенного методом Корнфилда, в верхних горизонтах исследуемых почв составляет: 25,8 мг — в лесной почве, 26,9 мг — в аналогичной почве пашни и 27,1 мг на 100 г — в дерново-слабоподзолистой глееватой. По содержанию аммонийного азота выделяются органогенные горизонты лесной почвы, где отмечено наибольшее его количество (11,6–17,2 мг на 100 г). В пахотных горизонтах исследуемых почв количество аммиачного азота составляет 2,8–3,5 мг на 100 г. Отмечена прямая зависи-

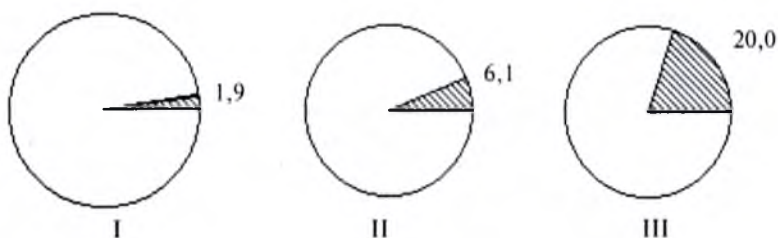


Рис. 44. Фракционный состав азотных соединений при окультуривании:

I — торфянисто-подзолисто-глеевая (лес); II — торфянисто-подзолисто-глеевая (пашня); III — дерново-слабоподзолистая глеевая (пашня);

□ — трудно- и негидролизуемые формы азота,

▨ — щелочногидролизуемый азот по Корнфилду (включая аммонийный), % от общего

мость содержания аммонийного азота от валового количества азота. Содержание аммиачного азота в профиле всех исследуемых почв снижается с глубиной.

Следует отметить, что, несмотря на внесение значительного количества минеральных азотных удобрений под многолетние травы, содержание азота в почве остается низким. Параллельное определение содержания гидролизуемого и аммонийного азота позволило выделить и количество собственно гидролизуемого азота, являющегося ближайшим резервом азотной пищи растений. Выявлено значительное преобладание этой фракции в пахотном горизонте мелиорированных почв по сравнению с лесной почвой. На рис. 44 схематически изображен азотный фонд почв, где очень четко видны различия его фракционного состава. Большую часть азотного фонда всех исследуемых почв составляют негидролизуемые и трудногидролизуемые формы азотных соединений. Однако у мелиорированных почв доля подвижного азота значительно выше и составляет в дерново-слабо-подзолистых глеевых почвах 20% от общего азота, в торфянисто-подзолисто-глеевых на пашне — 6,1, в то время как в верхнем 25-сантиметровом слое лесной почвы — всего 1,9.

### Выводы

Проведение осушительной мелиорации, внесение извести и минеральных удобрений значительно изменяют свойства болотно-подзолистых почв.

Изменяется морфологическое строение почвы, образуется пахотный горизонт со значительным содержанием гумуса и азота.

Происходит снижение почвенной кислотности и увеличивается степень насыщенности основаниями.

Относительное содержание легкоподвижных форм азотных соединений в составе азотного фонда мелиорированных почв значительно выше, чем у почв, не подвергающихся мелиорации.

Окультуривание лесных почв и коренная смена фитоценоза приводит к изменению структуры азотного фонда почв.

### 8.4. Влияние аэротехногенного загрязнения

В настоящее время во всех промышленно развитых регионах стоит проблема загрязнения почв аэротехногенными выбросами, в состав которых входят  $\text{SO}_x$ ,  $\text{NO}_x$  и тяжелые металлы (ТМ).

Изучение процессов миграции и трансформации соединений азота в почвах в районах воздействия промышленных предприятий

приобрело в настоящее время общее экологическое и санитарно-гигиеническое значение. С одной стороны, это появление антропогенного источника азота, так как аммиак и окислы азота, образующиеся при сжигании различных видов топлива, нарушают природный круговорот азота, с другой — отрицательное влияние компонентов аэротехногенных выбросов, особенно серы и тяжелых металлов, воздействующих непосредственно на почву и населяющие ее микроорганизмы.

Выпадение окислов серы и азота оказывает подкисляющее воздействие на почву и влияет на целый ряд почвенных процессов.

Сера может присутствовать в атмосфере в виде газов, кислот или солей, находящихся в растворе, или в форме аэрозолей. Она оседает на поверхность почвы в виде мокрых и сухих выпадений или непосредственно поглощается почвой из атмосферы.

Чувствительность почв к подкислению зависит от емкости обмена почвенного поглощающего комплекса почв и их исходной кислотности (Кочуров, 1983; Eisenhart, 1983; Lau, Mainwaring, 1985). Почвы с высокой емкостью катионного объема и величиной  $pH > 6$  лучше противостоят подкисляющему воздействию аэротехногенных поллютантов, чем почвы более кислые и имеющие низкую емкость обмена. В то же время отмечаются случаи устойчивости очень кислых почв с  $pH$  до 5 к дальнейшему подкислению. По данным М. Eisenhart (1983), на буферную способность почвы оказывает влияние ее водный режим: избыток или недостаток влаги снижает устойчивость почвы к подкислению.

С увеличением кислотности почвы уменьшается степень насыщенности почв основаниями, возрастают потери питательных веществ:  $K_2O$ ,  $NO_3$ ,  $P_2O_5$ .

Увеличение почвенной кислотности влечет за собой усиление подвижности в почве тяжелых металлов (Pb, Hg, Zn, Cd, Cu), а также потенциально токсичных элементов: Al, Mn и Fe (Glass et al., 1979). Под действием кислых осадков изменяются многие показатели почвенного плодородия, механизмы процессов этих изменений изучены недостаточно (Ford, 1980; Eisenhart, 1983; Добровольский, Гришина, 1985; Орлов, 1985).

Кислые осадки изменяют микробиологическую и биохимическую активность почв. Сера, содержащаяся в них, обладает фунгистатическим действием, а также ингибирует рост бактерий (Wainwright, 1980). В почвах под действием кислых дождей тормозится жизнедеятельность целлюлозоразрушающих микроорганизмов, а следовательно, и интенсивность разрушения органического вещества почв, изменяется скорость биологического круговорота, снижается азотфиксирующая и нитрифицирующая активность (Евдокимова, 1995).



Установлено, что накопление тяжелых металлов в почве в зонах промышленного загрязнения, в первую очередь, влияет на почвенные процессы, обусловленные деятельностью микроорганизмов.

Избыток ТМ в почве угнетает процессы трансформации органических остатков, снижает интенсивность их минерализации (El-Shinnawi et al., 1976). Уменьшается содержание гумуса, что приводит к нарушению почвенной структуры (Рева, Филатова, 1978; Федорищак, 1978).

Тяжелые металлы ингибируют процессы, связанные с накоплением азота в почве: их отрицательное влияние отмечено в опытах как с симбиотическими, так и со свободноживущими микроорганизмами (Huang et al., 1974; El-Shinnawi, Omran, 1976; Badura et al., 1977).

Также неблагоприятно действуют тяжелые металлы на процессы превращения азота: тормозят минерализацию органических соединений, резко уменьшают интенсивность процессов аммонификации и нитрификации (Букреева, 1972; Перцовская и др., 1975; Tyler, 1975; Евдокимова и др., 1984).

При содержании свинца и цинка в почве, равном 0,1%, наблюдается значительное ингибирование нитрификации (Wilson, 1977; Перелыгин и др., 1978). При концентрации никеля в почве 0,5% снижается скорость минерализации азотсодержащих органических соединений и активность нитрификации (Giashuddin, Cornfield, 1979). Медь и кадмий ингибируют процессы денитрификации (Bollag, Barabasz, 1979). Высокие дозы меди, магния, цинка, хрома снижают активность аммонификации и нитрификации (Premi, Cornfield, 1969). При концентрации ртути  $2 \text{ мг} \cdot \text{кг}^{-1}$  и выше почти весь минеральный азот почвы представлен аммонийной формой (Selmer-Olsen, 1985). Минерализация органического азота под влиянием  $\text{HgCl}_2$  лишь незначительно замедляется в минеральных почвах, а в торфяных остается неизменной. Медь в концентрации  $10^{-10}$ – $10^{-7} \text{ М}$  не оказывает влияния на минерализацию углерода и азота в старопашотных почвах (Minnich, Mc Bride, 1986).

Рядом исследователей (Rother et al., 1982) изучалось отношение процесса минерализации азотистых соединений в почве к избытку Cd, Pb и Zn. Установлено, что процесс нитрификации является более чувствительным по сравнению с процессами аммонификации. Вместе с тем в искусственно загрязненной почве присутствуют толерантные популяции нитрификаторов. Толерантность была приобретена ими после длительной лаг-фазы.

Работая с широкими наборами микроорганизмов и тяжелых металлов, А. Ф. Перцовская с соавторами (1985) пришли к заключению, что для нормирования металлов в почве перспективными могут быть такие показатели, как состав и численность отдельных групп микро-

организмов, интенсивность почвенных процессов, осуществляемых ими, активность ферментов. Наиболее информативными из них оказались численность грибов и их доля в составе почвенного микробоценоза, процессы азотфиксации и «дыхания» почвы, активность инвертазы.

Техногенная нагрузка оказывает особенно сильное влияние на микроорганизмы, использующие органические и минеральные формы азота, на целлюлозолитическую и протеазную активность.

Промышленное загрязнение может как подавлять, так и стимулировать интенсивность азотфиксации, минерализации органических остатков, нитрификации и денитрификации. Эффект, оказываемый загрязнением на эти процессы, зависит от состава поступающих в почву веществ, интенсивности загрязнения, буферной способности почв.

Высокие концентрации большинства распространенных в составе промышленных выбросов тяжелых металлов подавляют активность процессов минерализации азотсодержащих органических соединений и нитрификации, приводя тем самым к уменьшению содержания в почве подвижного азота минеральных соединений. Устойчивость процессов трансформации азотсодержащих соединений по отношению к токсическому действию тяжелых металлов не одинакова в разных почвах. Так, никель в концентрации  $5 \text{ г} \cdot \text{кг}^{-1}$  почвы уменьшает активность нитрификации в почве при pH 5,8 на 66%, а с pH 6,9 и 7,6 соответственно на 29 и 30%, при этом в кислой почве наблюдается накопление аммонийного азота (Giashuddin, Cornfield, 1979).

В литературе приводятся противоречивые данные о минимальных концентрациях тяжелых металлов, оказывающих токсическое действие на процессы аммонификации и нитрификации. Согласно одним из них, медь и хром подавляют активность этих процессов при содержании 10 и  $1 \text{ г} \cdot \text{кг}^{-1}$  почвы соответственно (Premi, Cornfield, 1969). Из других следует, что токсичное действие проявляется уже при содержании 0,1 г металлов на 1 кг почвы (Чегринцев и др., 1980). Более низкие концентрации тяжелых металлов, вероятно, не вызывают снижения активности аммонификации и нитрификации и могут даже стимулировать их.

Достаточно хорошо изучено влияние токсичных газовых выбросов промышленных предприятий на активность микробиологических процессов. Показано, что двуокись азота подавляет рост аэробных и анаэробных несимбиотических азотфиксаторов в почве (Smith, Mayfield, 1978). Ингибирующее влияние наблюдается уже при концентрации 0,2–5,0 мг на  $\text{м}^3 \text{NO}_2$ , дальнейшее повышение концентрации газа до 50 мг на  $\text{м}^3$  приводит к нарастанию токсического эффекта. Окись углерода в концентрации 50 мг на  $\text{м}^3$  также вызывает угнетение азотфиксирующих ферментных систем почвенных микроорганизмов.

В то же время один из самых распространенных промышленных выбросов — двуокись серы, обладающая сильным токсичным для растений действием, не приводит к ингибированию азотфиксации при концентрациях, в десятки раз превышающих концентрации в атмосфере крупных промышленных центров (Исламов, Чундерова, 1976).

Наиболее показательный результат влияния токсичных газов и тяжелых металлов — подавление азотфиксирующей активности почвенных микроорганизмов. Активность аммонификации и нитрификации служит более устойчивым показателем, а в ряде случаев промышленное загрязнение вызывает даже активизацию этих процессов (Giashuddin, Cornfield, 1979; Умаров, Азиева, 1980; Wainwright, 1980). Повышение pH почв и уменьшение гидролитической кислотности является основной причиной стимулирования нитрификационной активности некоторых загрязненных почв (Важенина, 1983). Повышение активности трансформации азотсодержащих соединений происходит при поступлении в почву азотсодержащей пыли выбросов коксохимического производства, при этом возрастает в почве содержание азота аммония и нитратов (Wainwright, Killham, 1982).

В почве, загрязняемой комплексом токсичных газов, тяжелых металлов и других соединений, отмечается преобладание бактерий, потребляющих минеральный азот. Эта группа микроорганизмов является наиболее устойчивой к загрязнению почвы промышленными выбросами, тогда как количество аммонифицирующих бактерий и азотобактера уменьшается (Стефурак, 1982).

В районе аэротехногенного воздействия Костомукшского горно-обогатительного комбината в 1993–1995 гг. изучали воздействие выбросов серы, оксидов азота и тяжелых металлов на фракционный состав азотных соединений иллювиально-железистых песчаных подзолов под сосновыми лесами. Данные почвы являются типичными для северотаежной подзоны Фенноскандии. Объем серы и азота, выпадающих с аэротехногенными выбросами Костомукшского комбината, ежемесячно определяли в атмосферных осадках. Основное количество серы выпадает в районе до 30–40 км к западу от комбината и составляет в среднем под пологом леса 311 мг на м<sup>2</sup> и 500 мг на м<sup>2</sup> на открытых участках в год (рис. 45, 46).

Выпадения аммонийного и нитратного азота относительно невелики и составляют 90–95 мг на м<sup>2</sup> нитратов и 94–105 мг на м<sup>2</sup> аммония на открытых местах и соответственно 30–70 мг на м<sup>2</sup> и 60–100 мг на м<sup>2</sup> в год (Poikolainen, Lippo, 1995).

Количество железа в подзолистых почвах Карелии колеблется в широких пределах и может достигать 1,5–2%. В лесных подстилках пробных площадей накопление железа отмечено на расстоянии до

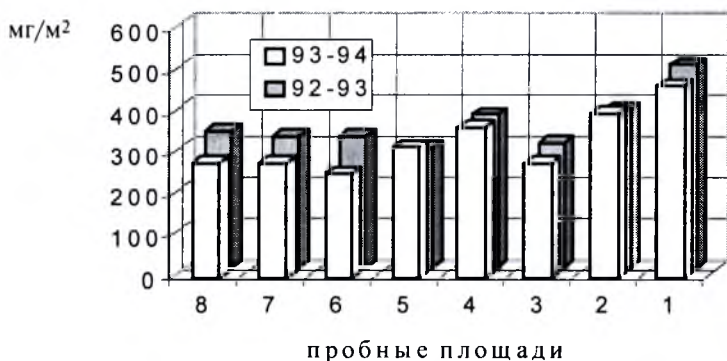


Рис. 45. Выпадение серы под пологом леса

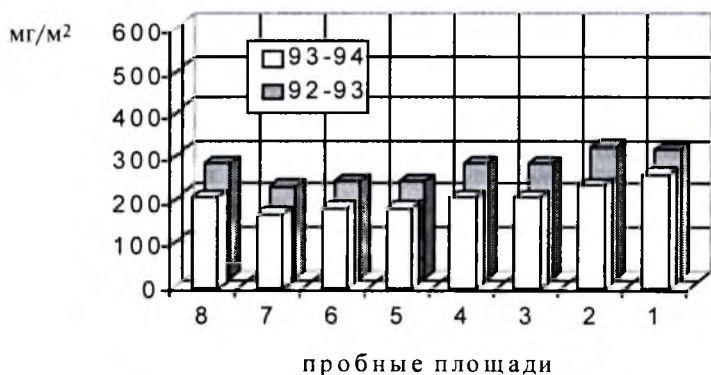


Рис. 46. Выпадение серы на открытых участках пробных площадей

30 км от комбината (до 0,5%). При большем удалении от комбината — подстилки более чистые. С глубиной накопление железа в почвенном профиле возрастает (табл. 75).

В почвах северной тайги на территории Карелии содержание марганца в почвах изменяется от 3–7 до 100 мг · кг<sup>-1</sup>. В обследованных почвах содержание марганца колеблется в подстилках от 110 до 530 мг · кг<sup>-1</sup>, наибольшее количество накапливается на ближайших к комбинату трех пробных площадях.

Кадмий является одним из самых токсичных элементов для живых организмов. Среднее варьирование его в почвах 0,59–1,1 мг · кг<sup>-1</sup> (Рэуце, Кырстя, 1986). В исследуемых почвах кадмий не накапливается

Таблица 75

Валовое содержание тяжелых металлов в подзолах иллювиально-железистых песчаных на пробных площадях в районе Костомукшского горно-обогатительного комбината, мг на кг а. с. почвы

№ п. п., расст. от ГОКа, км	Горизонт, глубина, см	Fe	Cr	Ni	Mn	Cu	Zn	Pb	Cd
I. 5	0 0–5	3200	9,2	7,6	530	11,2	34,4	13,9	0,18
	5–16	3300	59,0	5,7	66	1,0	8,9	7,1	1,06
	Bf 16–38	11900	27,7	11,1	148	5,4	14,8	9,7	0,81
	B2 38–52	9100	21,5	13,8	164	5,9	17,3	6,4	0,40
	C 52–72	9700	21,2	14,6	134	7,0	14,4	8,0	0,44
II. 16	0 0–5	4800	20,1	4,1	112	3,8	29,0	14,9	0,17
	A2 5–13(15)	3500	99,7	7,1	68	1,7	4,7	6,4	0,40
	Bf 13(15)–19	20400	20,2	8,9	275	8,3	15,4	5,8	0,28
	B2 19–37	15300	20,1	14,8	348	9,1	23,0	8,5	0,75
	BC 37–77	13800	24,1	8,8	247	14,5	19,7	5,8	0,35
III. 22	0 0–5	3700	12,7	3,8	480	5,7	55,7	23,7	0,44
	A2 5–11(19)	7300	32,0	3,8	182	1,4	5,2	16,0	0,46
	Bf 11(19)–23	22900	36,9	12,9	234	5,9	30,2	13,2	0,94
	B2 23–28	17600	31,8	13,3	253	6,9	21,3	10,2	1,19
	BC 28–60	17300	36,1	12,4	282	7,0	19,2	12,0	1,09
	C 60–глубже	17200	35,8	12,6	282	6,8	19,5	12,8	0,80
IV. 27	0 0–4	5000	8,9	4,5	406	7,5	39,2	30,5	0,45
	A2 4–10(11)	7600	24,0	4,7	111	1,9	5,5	7,6	0,40
	Bf 10(11)–18	15000	28,2	8,9	168	4,7	22,0	8,5	0,58
	B2 18–31	14600	28,1	8,8	206	4,8	15,7	7,6	0,57
	BC 31–60	10500	28,8	8,8	180	5,4	11,6	5,7	0,28
V. 33	0 0–6	1400	15,8	5,2	200	5,3	17,8	27,6	0,50
	A2 6–13	6900	27,9	5,8	119	1,3	6,5	8,4	0,34
	Bf 13–20(28)	28700	32,4	18,3	221	7,9	40,0	13,0	0,69
	B2 20(28)–36(40)	19500	40,3	22,8	298	10,3	41,1	10,3	0,74
	BC 36(40)–78	18600	47,2	24,2	258	10,4	31,6	9,4	0,75
VI. 63	0 0–3	1500	8,4	5,3	50	5,4	34,6	33,2	0,39
	A2 3–14	5500	20,0	4,9	108	1,3	5,1	6,6	0,11
	Bf 14–28	18500	24,0	10,8	228	6,0	21,5	8,4	0,23
	B2 28–56	18300	31,8	11,6	—	59,3	34,3	7,6	0,30
	BC 56–74	12500	27,8	13,5	238	7,2	20,4	7,5	0,34
VII. 85	0 0–3	1900	12,8	4,7	160	6,5	42,0	32,0	0,45
	A2 3–8	10600	20,1	5,8	173	1,5	10,0	10,3	0,46
	Bf 8–17	16900	36,3	14,1	192	6,1	30,7	11,2	0,58
	B2 17–35	18000	36,0	18,8	230	9,1	27,7	11,1	0,57
	BC 35–58	21500	24,1	15,9	357	6,9	28,0	11,2	0,86
VIII. 114	0 0–3	1100	12,7	5,8	110	6,2	19,9	31,7	0,42
	A2 3–14(16)	6400	19,9	4,2	123	0,9	5,9	4,9	0,28
	Bf 14(16)–32	15800	20,4	11,5	285	4,4	34,0	7,7	0,47
	B2 32–49	16300	23,9	14,9	254	8,3	24,6	8,4	0,63
	C 49–74	13200	19,9	12,6	264	7,3	20,2	8,4	0,68



в подстилках, его содержание составляет в среднем по профилю  $0,11-1,06 \text{ мг} \cdot \text{кг}^{-1}$ .

Количество свинца варьирует в почвах от  $15$  до  $100 \text{ мг} \cdot \text{кг}^{-1}$  (Рэуце, Кырстя, 1986). В исследуемых почвах содержание свинца от  $4,9$  до  $33,2 \text{ мг} \cdot \text{кг}^{-1}$ , при этом он накапливается в подстилках до  $13,9-33,2 \text{ мг} \cdot \text{кг}^{-1}$ , в отдельных случаях достигая ПДК ( $32 \text{ мг} \cdot \text{кг}^{-1}$ ).

Обычно в почвах количество никеля колеблется в очень широких пределах от  $5$  до  $500 \text{ мг} \cdot \text{кг}^{-1}$ , в среднем составляя  $40 \text{ мг} \cdot \text{кг}^{-1}$ . В исследуемых почвах содержание никеля составляет  $3,8-24,2 \text{ мг} \cdot \text{кг}^{-1}$ , увеличиваясь с глубиной. Наибольшее его накопление выявлено в почвах в непосредственной близости от комбината ( $7,6 \text{ мг} \cdot \text{кг}^{-1}$ ).

Количество хрома в почвах в районе комбината колеблется от  $8,4$  до  $99,7 \text{ мг} \cdot \text{кг}^{-1}$ , причем в минеральных горизонтах содержание его выше, чем в лесных подстилках. Максимальные показатели выявлены в элювиальных горизонтах на расстоянии  $10 \text{ км}$  от источника выбросов и составляют  $59-99,7 \text{ мг} \cdot \text{кг}^{-1}$ , не достигая при этом предельно допустимых концентраций.

Обычно содержание меди в почвах составляет  $2-100 \text{ мг} \cdot \text{кг}^{-1}$ , в среднем —  $20$ . В исследуемых почвах содержание меди ниже ПДК в два раза. Максимальное ее накопление выявлено в подстилках вокруг ГОКа и составляет  $11,2 \text{ мг} \cdot \text{кг}^{-1}$ . Варьирование по профилю  $1,0-14,5 \text{ мг} \cdot \text{кг}^{-1}$ .

Фоновое содержание цинка в почвах составляет обычно  $10-200 \text{ мг} \cdot \text{кг}^{-1}$ . Следует отметить, что в изученных почвах распределение цинка по профилю носит элювиально-иллювиальный характер и колеблется в целом от  $4,7$  до  $55,7 \text{ мг} \cdot \text{кг}^{-1}$ . Зависимости накопления от расстояния до комбината не выявлено.

В целом можно отметить, что основным загрязнителем лесных подстилок в исследуемом районе является железо. Вблизи комбината накапливается  $\text{Cr}$ ,  $\text{Ni}$ ,  $\text{Cu}$ ,  $\text{Mn}$ , не достигая, однако, принятых в настоящее время предельно допустимых концентраций.

Воздействие выбросов Костомукшского ГОКа на содержание органического вещества и фракционный состав азотных соединений почв комплексное: с одной стороны, это дополнительное поступление углерода и азота, которое должно способствовать увеличению содержания этих веществ в почве, а с другой — это выбросы серы, увеличивающие почвенную кислотность, и тяжелые металлы, отрицательно действующие, как следует из литературных источников, на процессы азотфиксации и трансформации органического вещества почвы. Выбросы комбината на протяжении более десяти лет практически не повлияли на содержание органического вещества и азота в подстилках (табл. 76).



Таблица 76

Содержание органического углерода и азота в лесных подстилках сосновых лесов в районе действия Костомукшского ГОКа  
(среднее и отклонение от среднего), %

№ п. п., расстояние от ГОКа, км								
	I, 5	II, 16	III, 22	IV, 27	V, 33	VI, 63	VII, 85	VIII, 114
Орг. углерод	28,0 ± 0,85	35,4 ± 1,54	29,3 ± 0,15	33,7 ± 3,87	38,1 ± 1,61	23,4 ± 1,30	37,8 ± 0,50	28,0 ± 0,58
Азот	0,85 ± 0,02	0,852 ± 0,02	1,115 ± 0,01	0,86 ± 0,03	0,772 ± 0,03	0,95 ± 0,03	0,78 ± 0,01	0,75 ± 0,02

Таблица 77

Содержание соединений азота в подзолах иллювиально-железистых песчаных в сосновых лесах в районе Костомукшского ГОКа

№ п. п., расст. от ГОКа, км	Горизонт, глубина, см	N общ., %	N-NO <sub>3</sub>	N-NH <sub>4</sub>	N органический	
					гидроли- зуемый	негидроли- зуемый
					мг на 100 г / % от общего	
I. 5	0 0–5	0,975	1,5 / 0,1	21,5 / 2,2	22,0 / 2,3	9,30 / 95,4
	A2 5–14(16)	0,067	0,2 / 0,3	2,4 / 2,6	4,9 / 7,3	59,5 / 88,8
	Bf 14(16)–38	0,037	0,1 / 0,3	1,3 / 3,5	2,9 / 7,8	32,7 / 88,4
II. 16	0 0–5	0,954	1,2 / 0,1	23,7 / 2,5	28,4 / 3,0	900,7 / 94,4
	A2 5–13(15)	0,066	0,6 / 0,9	1,4 / 1,2	1,6 / 2,4	62,4 / 94,6
	Bf 13(15)–19	0,029	0,5 / 1,7	0,9 / 3,1	1,9 / 2,4	25,7 / 88,6
III. 22	0 0–5	1,195	2,1 / 0,2	30,0 / 2,5	47,8 / 4,0	1115,1 / 93,3
	A2 5–11	0,085	0,8 / 1,0	5,1 / 6,0	4,2 / 4,9	74,9 / 88,1
	Bf 11(19)–23	0,056	0,4 / 0,7	3,2 / 5,7	3,8 / 6,8	48,6 / 86,8
IV. 27	0 0–4	0,911	2,1 / 0,2	27,8 / 3,1	32,7 / 3,6	848,7 / 93,1
	A2 4–10	0,080	0,3 / 0,4	1,9 / 2,4	3,1 / 3,9	74,7 / 93,3
	Bf 10(11)–18	0,040	0,1 / 0,25	1,8 / 4,5	1,8 / 4,5	36,3 / 90,75
V. 33	0 0–6	0,833	2,0 / 0,2	26,7 / 3,2	27,1 / 3,3	777,2 / 93,3
	A2 6–13	0,052	0,7 / 1,4	3,4 / 6,5	4,6 / 8,9	43,3 / 83,2
	Bf 13–20(28)	0,028	0,2 / 0,7	1,2 / 4,3	2,5 / 8,9	24,1 / 86,1
VI. 63	0 0–3	1,105	0,9 / 0,1	20,1 / 1,8	24,3 / 2,2	1059,7 / 95,9
	A2 3–14	0,097	0,2 / 0,2	0,9 / 0,9	3,6 / 7,2	92,2 / 95,1
	Bf 14–28	0,063	0,1 / 0,2	0,8 / 1,3	1,8 / 5,8	60,9 / 96,6
VII. 85	0 0–3	0,851	1,4 / 0,2	24,5 / 2,9	26,6 / 3,1	798,5 / 93,8
	A2 3–8	0,050	0,6 / 1,2	1,4 / 2,8	3,6 / 7,2	44,4 / 88,8
	Bf 8–17	0,031	0,2 / 0,7	0,9 / 2,9	1,8 / 5,8	28,1 / 90,6
VIII. 114	0 0–3	0,801	1,0 / 0,1	19,7 / 2,5	18,0 / 2,3	762,3 / 95,1
	A2 3–14	0,043	0,1 / 0,2	2,0 / 4,7	4,2 / 9,8	36,7 / 85,3
	Bf 14(16)–32	0,032	0,1 / 0,3	0,7 / 2,2	3,1 / 9,7	28,1 / 87,8

Повышенное содержание общего азота в лесных подстилках на пробной площади III объясняется преобладанием здесь в напочвенном покрове черники, содержащей значительное количество азота.

Фракционный состав азотных соединений почв на всех пробных площадях идентичен (табл. 77). Содержание минерального азота колеблется от 1,9 до 3,4% от общего и не зависит от расстояния от комбината. Дополнительное количество азота, поступающее с выбросами, вероятно, поглощается растительностью в условиях его недостатка.

Известно, что рост лесов в центральной Европе усилился в последние десятилетия отчасти из-за обильных выпадений азота (Malkonen, 1991).

Таким образом, выбросы атмосферных загрязнителей Костомукшского ГОКа не оказали значительного воздействия на азотный режим почв окружающих сосновых лесов.

Микробиологические исследования почв показали, что структура микробоценозов здесь характерна для северных лесных почв. По сравнению с более южными аналогами микрофлора малочисленна и однообразна, наиболее бедно представлены важнейшие группы микроорганизмов: микромицеты, актиномицеты, целлюлозоразрушающие (табл. 78). Приурочены они, в основном, к лесным подстилкам. В составе микробных ассоциаций присутствуют все группы микроорганизмов, отвечающих за важнейшие процессы в почве: аммонификацию, деструкцию полисахаридов, азотфиксацию. В первые

Таблица 78

Структура микробоценозов лесных подстилок сосняков в районе действия Костомукшского ГОКа (по неопубликованным данным Н. И. Германовой), тыс. на г а. с. почвы

№ п. п.	Микроскопические грибы			Бактерии, усваивающие органический азот		Бактерии, усваивающие минеральный азот	Олиго-нитрофилы	Олиготрофы	Актиномицеты
	Общее число	<i>Penicillium</i>	<i>Mucor</i>	Общее число	Споровые				
I	88	85	3	468	150	17769	4071	446	13
II	61	58	3	2258	186	4794	271	290	<10
III	84	88	—	196	7	8854	4759	595	6
IV	97	102	5	292	—	5566	838	235	2
V	166	165	1	995	466	16120	3090	1038	4
VI	78	78	Нет	686		6997	2281	197	<10
VII	77	75	2	239	87	3940	3362	446	2
VIII	39	32	2	316	21	15362	3737	184	<10

7–9 лет с начала функционирования комбината отмечается повышенная биологическая активность лесных почв на удалении 0,5–5,0 км от источника загрязнения (Загуральская, 1992, 1994). По мнению автора, поступающие извне металлы-загрязнители стимулируют микробный метаболизм, и на этом этапе процессы загрязнения – самоочищения почвы сбалансированы. Исследования, проведенные через 12 лет с начала функционирования комбината, свидетельствуют о том, что на данном этапе признаков явного угнетения или стимуляции микробиологических процессов в изучаемых почвах не наблюдается. Колебания в численности отдельных групп микроорганизмов в почве обусловлены естественными особенностями свойств самой почвы. Полученные данные свидетельствуют также о тенденции накопления в подстилках вблизи комбината (5 км) протеазы и уреазы, а также интенсификации каталазной активности (табл. 79).

Колебания показателей активности почвенных ферментов на других пробных площадях связаны, скорее всего, с неравномерным распределением в почвах по градиенту поллютантов ГОКа. Исследования показали, что через 12 лет с начала работы комбината почвенные микробные сообщества в зоне его действия в целом сохранили черты, свойственные лесным почвам североазиатской подзоны.

Таблица 79

Ферментативная активность подзолов иллювиально-железистых песчаных в сосновых лесах в районе действия Костомукшского ГОКа через 12 лет с начала его функционирования (по неопубликованным данным Н. И. Германовой)

№ п. п., расст. от ГОКа, км	Горизонт	Протеаза, мг аминного азота на г	Уреаза, мг N-NH <sub>4</sub> на г	Каталаза, мл O <sub>2</sub> за 5 минут
I, 5	0	2,7	7,6	38,3
	A2	1,3	3,2	4,2
II, 16	0	2,2	5,4	27,5
	A2	0,8	1,0	4,8
III, 22	0	2,3	3,4	23,5
	A2	1,0	0,8	4,6
IV, 27	0	1,5	3,4	26,5
	A2	1,0	0,4	4,4
V, 33	0	1,9	3,2	28,2
	A2	0,8	0,5	4,3
VI, 63	0	1,3	2,4	30,2
	A2	0,8	0,4	3,1
VII, 85	0	1,3	1,2	22,8
	A2	0,5	0,4	3,5
VIII, 114	0	1,0	2,6	27,3
	A2	0,8	0,6	4,4

Степень биогенности почв слабо связана с удаленностью от источника выбросов. Повышенным количеством бактерий азотного цикла и активностью ферментов выделяются почвы вблизи комбината, а именно, в пятикилометровой зоне. С течением короткого промежутка времени снизился стойкий стимулирующий эффект техногенных эмиссий на активность почвенных микроорганизмов в импактной зоне, наблюдавшийся в первые 9 лет работы комбината.

### Выводы

Воздействие выбросов комбината на почву прослеживается только в непосредственной близости от него и касается, в основном, лесной подстилки. Выявлено накопление в лесных подстилках железа, увеличивается содержание хрома, никеля, меди и марганца, не превышая в настоящее время предельно допустимых концентраций.

Поступление с аэротехногенными выбросами азота в размере не более 200 мг на м<sup>2</sup> не изменяет ее азотный режим, а количество тяжелых металлов, не превышающее ПДК, не вызывает явного угнетения микробиологической деятельности и не отражается на процессах трансформации органических азотсодержащих соединений.

## Заключение

Исследование закономерностей накопления и превращения соединений углерода и азота в лесных биогеоценозах Восточной Фенно-скандии показало, что органопродил лесных почв относятся к грубогумусному типу, однако в их строении и свойствах имеются значительные различия. Их морфологическое строение и состав органического вещества свидетельствуют о том, что они могут быть разделены на три подтипа: малогумусные, типичные грубогумусные и торфянистые грубогумусные.

К первым относятся органопродил поверхностно-подзолистых почв и подзолов иллювиально-железистых. Им свойственны мало-мощный органогенный горизонт, слабое проявление процесса иллювиирования гумуса. Распределение органического вещества по профилю носит слабо выраженный элювиально-иллювиальный характер. В этих почвах отмечаются низкие запасы органического вещества. Вследствие своеобразного состава опада, основную долю которого составляет древесной, а также малой численности почвенной фауны минерализация опада здесь происходит очень медленно. Это подтверждается и биохимическим составом лесных подстилок. Здесь отмечается особенно много воскосмолов и веществ типа битумов (негидролизуемого остатка), мала доля водорастворимых углеводов. Этим обусловлен и компонентный состав органогенного горизонта, исследование которого показало малое количество измельченных растительных остатков.

К следующей группе могут быть отнесены органопродил почв с большей увлажненностью, а именно, подзолы иллювиально-гумусово-железистые. Благодаря большей увлажненности почвы изменился состав опада — появилось больше зеленых частей растений (кустарничков), поэтому в данных условиях происходит более глубокая трансформация опада. Морфологически это выражается в большей разложениости органического материала, более интенсивном иллювиировании гумуса вниз по профилю. В этих почвах более разнообразна фауна, в органогенном горизонте растительные остатки сильнее измельчены, о чем свидетельствуют данные компонентного состава лесной подстилки. Как показало изучение биохимического состава подстилки, здесь концентрируется повышенное количество растворимых углеводов. Данные морфологических и аналитических исследований

свидетельствуют о том, что для минерализации и гумификации растительных остатков здесь складываются оптимальные условия.

К третьей группе относятся органофилы болотно-подзолистых почв. Несмотря на достаточно разнообразную почвенную фауну, разложение растительных остатков в этих условиях замедленное. Значительную долю опада составляют долгомошные и сфагновые мхи. По данным биохимического анализа, здесь снижается доля водорастворимых углеводов, увеличивается доля целлюлозы и негидролизуемого остатка.

В целом можно отметить, что данные морфологического строения и состава лесных подстилок, а также органического вещества в почве в целом хорошо коррелируют друг с другом.

Основная масса азотных соединений биогеоценозов сосредоточена в почве, а именно — в почвенном гумусе. Азот живой фитомассы насаждения составляет лишь около 10% от общего содержания его в биогеоценозе. Как в северной, так в среднетаежной подзоне биогеоценозы характеризуются положительным балансом круговорота азота и высокой степенью замкнутости систем, что свидетельствует об устойчивости характера биологического круговорота азота.

Наиболее активные процессы обмена вещества происходят в системе растения — почва. На построение годичного прироста и процессы метаболизма насаждения расходуют ежегодно более половины минерального азота почвы, с опадом возвращается 75–85% поглощенного азота.

В почвах климаксовых насаждений многие противоположно направленные процессы азотного цикла уравновешены: иммобилизация и деструкция белка почвенных микроорганизмов, гумификация и деструкция гумуса, аммонификация и образование лабильных форм органического азота. В более молодых (средневозрастных) насаждениях преобладают процессы иммобилизации азота микроорганизмами, процессы гумификации интенсивнее деструкции гумусовых соединений.

В биогеоценозах северотаежной подзоны содержание азота в первичной продукции ниже, чем в средней тайге. Для северотаежных лесов характерно существенное преобладание азота, входящего в мортмассу, над количеством азота в живом веществе (в 9 раз), в то время как в среднетаежной подзоне это соотношение уже (2,5). В почвах северной тайги, где крайне низка биологическая активность, запас белка микроорганизмов в 20 раз, а интенсивность ассоциативной азотфиксации в 6 раз ниже, чем в среднетаежной подзоне.

Поступление азота в биогеоценоз и потери его во внешнем цикле малы, по сравнению с количественными характеристиками динамики



азота во внутреннем цикле биологического круговорота. Поступает в систему значительно больше азота (6,5), чем из нее выносятся (0,1 кг · га<sup>-1</sup> азота в год).

Азотный фонд почв хвойных лесов таежной зоны характеризуется высоким содержанием негидролизуемого азота (90–97%), бедностью минеральным (0,5–3,5%) и гидролизуемым азотом (3–10% от общего).

Накопление в почве подвижных азотсодержащих соединений тесно связано с наличием общего азота, запасы которого определяются основными факторами почвообразования.

Количество общего азота в почве ниже в северной, чем в среднетаежной подзоне, что обусловлено пониженными температурами, низкой продуктивностью насаждений и слабой микробиологической активностью почв.

В пределах одной подзоны в почвах, сформировавшихся на более тяжелых по механическому составу породах, запасы всех форм азотных соединений, как правило, выше: под сосновыми насаждениями в иллювиально-железистых песчаных подзолах с наличием в профиле утяжеленных прослоек на двучленных отложениях в 1,5–2 раза по сравнению с подзолами на однородных песках, под ельниками в элювиально-поверхностно-глееватых почвах на ленточных глинах в 1,5 раза выше, чем в супесчаных иллювиально-гумусово-железистых подзолах.

Для сходных по генезису почв характерны свои специфические особенности трансформации азотных соединений в зависимости от произрастающей на них растительности: в ельниках биологический круговорот азота интенсивнее, чем в сосняках, больше азота возвращается в почву с опадом, но запасы его в лесной подстилке ниже, так как активнее идет его переработка микроорганизмами.

Изучение превращения азота в почвах сосновых и еловых насаждений в экологических рядах по увлажнению показало, что запасы азота нарастают по мере увеличения увлажненности, что приводит к росту продуктивности насаждений лишь в автоморфных условиях, на гидроморфных почвах производительность древостоев снижается.

Оптимальные условия для трансформации органических азотсодержащих соединений и почвенного питания растений складываются в сосняках черничных и ельниках кисличных, отличающихся наиболее высокой продуктивностью.

Строение азотного фонда почв хвойных лесов характеризуется высокой стабильностью: основная его часть представлена негидролизуемым азотом, составляющим не менее 90%, а количество лабильных форм — не более 10–12%. Даже проведение выборочных и сплошных

рубков не приводит к коренным изменениям состава азотного фонда почв. Лишь при полной качественной смене фитоценоза существенно изменяется фракционный состав азотных соединений в почве. Изменения азотного фонда в различных экологических условиях носят количественный характер, т. е. изменяется величина накопления тех или иных соединений, в то время как соотношение их изменяется слабо.

В течение вегетационного периода, а также и в отдельные годы наблюдается количественная изменчивость содержания в почвах подвижного азота (минерального и гидролизуемого), связанная с метеорологическими условиями. Однако характер сезонной динамики азота в почвах определяется и интенсивностью его поглощения растениями: в средневозрастных насаждениях, отличающихся активным поглощением азота древостоями, наблюдается снижение его содержания в почвах в середине и к концу вегетации, что не характерно для климаксовых насаждений. Во всех почвах отмечается осенний максимум накопления азота в связи с поступлением свежего растительного опада. В почвах вырубок пик накопления подвижного азота приходится на период с наиболее благоприятными гидротермическими условиями для функционирования микроорганизмов, ответственных за трансформацию в почве азота (это, как правило, летние месяцы).

Низкое содержание подвижного азота в составе азотного фонда почв определяет невысокую продуктивность хвойных насаждений. В сосновых биогеоценозах зависимость продуктивности древостоев от количества азота в почве очень тесная (коэффициент корреляции 0,9), а в еловых выражена слабее (0,6).

Опыты с внесением минеральных удобрений, повышающих плодородие почв и продуктивность насаждений, свидетельствуют о большей потребности хвойных насаждений в азоте, чем им предоставляет почва в естественных условиях. Минеральные удобрения изменяют соотношение фракций азота в почве, увеличивая количество минеральных азотных соединений на 2–3 года, которое затем становится прежним.

Таким образом, проведенные исследования показали, что почва является основным носителем азота в лесных биогеоценозах, устойчивость азотного фонда почв в зональном, экологическом и временном аспектах определяет стабильность биологического круговорота азота.

## Conclusion

Investigations into the patterns of storage and transformation of carbon and nitrogen compounds in forest biogeocenoses of East Fennoscandia have shown that the organic profiles of forest soils belong to the mor type, but exhibit significant differences in the structure and properties. Their morphological structure and organic matter composition suggest grouping into three subtypes: shallow humus, orthic mor and peaty mor profiles.

The first subtype includes the organic profiles of surface and ferric podzols. They typically have a thin organic horizon and minor humus illuviation. Organic matter distribution across the profile is of the indistinct eluviation-illuviation mode. Organic matter stores in the soils are quite poor. The peculiar composition of die-back, generated mainly by the tree stand, and the scant soil fauna result in very slow die-back mineralisation. This is evidenced also by the biochemical composition of forest litters. They contain particularly significant amounts of wax resins and bitumen-like substances (non-hydrolysable residue), and a minor proportion of water-soluble carbohydrates. These features are responsible for the organic horizon fabric, which was noted for a low amount of disintegrated plant residues.

The next subtype comprises organic profiles of moister soils, namely humo-ferric podzols. Higher soil moisture results in modifications in the litter composition — the proportion of green plant biomass (from dwarf shrubs) grows, facilitating a more profound transformation of the die-back. Morphologically, this is manifest in the higher degree of decomposition of the organic matter and more intensive humus illuviation down the profile. The fauna in these soils is more diverse, and plant residues in the organic horizon are therefore more disintegrated, as indicated by the forest litter fabric. Studies of the biochemical composition of the litter show an elevated concentration of soluble carbohydrates the horizon. Morphological and analytical data evidence optimum conditions for mineralisation and humification of plant residues in the soils.

The third subtype includes organic profiles of swamp podzols. Although the soil fauna is relatively diverse, decomposition of plant residues in such soils is slower. The bulk of the die-back is haircup and sphagnum mosses. Biochemical analysis indicates a decrease in the proportion of soluble carbohydrates and an increase in the proportion of non-hydrolysable residue cellulose.

Generally speaking, data on the morphological structure and composition of forest litters, as well as of the organic matter at large are in good agreement with each other.

Most nitrogen compounds in biogeocenoses concentrate in the soil, to be more specific – the soil humus. Nitrogen in the stand living phytomass accounts for as little as 10% of the total nitrogen in the biogeocenosis. Biogeocenoses both in the northern and in the middle taiga subzones demonstrate a positive nitrogen cycle budget and a highly closed system, indicating the stability of the nitrogen cycle in them.

Metabolic processes are the most active in the plant – soil system. Stands annually lose over a half of the soil mineral nitrogen to growth and metabolism, and recover 75–85% of the nitrogen consumed from die-back.

Many oppositely directed processes of the nitrogen cycle reach a balance in the soils of climax stands: immobilisation and destruction of the soil microorganism protein, humification and humus destruction, ammonification and formation of labile organic nitrogen. In younger (middle-aged) stands, nitrogen immobilisation processes are more intensive and humification prevails over humus destruction.

North-taiga biogeocenoses have a lower primary production of nitrogen than those in the mid-taiga. In north-taiga forests, nitrogen found in dead remains markedly dominates over that in the living matter (9 times), whereas the ratio for the mid-taiga subzone decreases to 2.5. North-taiga soils, where the biological activity is very low, microorganism protein reserves are 20 times lower, and the rate of microbial nitrogen fixation – 6 times lower than in mid-taiga soils.

Nitrogen supply to the ecosystem and its losses in the external cycle are negligible relatively to the nitrogen dynamics indices in the internal biological cycle. Nitrogen supply to the system is much greater (6.5 kg/ha<sup>-1</sup> p.a.) than its losses (0.1).

The nitrogen pool in soils under boreal coniferous forests is noted for high content of non-hydrolysable nitrogen (90–97%), lack of mineral (0.5–3.5%) and hydrolysable nitrogen (3–10% of the total).

Storage of mobile nitrogen-bearing compounds in the soil is closely related to the availability of total nitrogen, which depends on the principal soil formation factors.

Total nitrogen content in the soil is lower in the north- than in the mid-taiga subzone, due to lower temperatures, low stand productivity and poor microbial activity in the soils.

Within the same subzone, the stores of all nitrogen forms are usually greater in the soils developing over rocks with a heavier texture: 1.5–2 times greater in pine-stand-bearing sandy ferric podzols with finer-textured layers over binary deposits than in podzols on uniform sands; 1.5 times greater in

spruce-stand-bearing epigleyic eluvial soils on varved clays than in loamy sand humo-ferric podzols.

Soils of similar genesis have specific characteristics of the transformation of nitrogen compounds depending on the vegetation type: spruce stands have a more intensive biological nitrogen cycle than pine stands; more nitrogen returns to the soil with die-back, but its stores in the forest litter are lower, since it is being more actively transformed by microorganisms.

Studies of nitrogen transformations in soils underlying pine and spruce stands with different moisture regimes have demonstrated that nitrogen stores increase with increasing moisture, enhancing the stand productivity only under automorphic conditions, whereas the productivity of stands on hydromorphic soils decreases.

Optimum conditions for the transformation of organic nitrogen-bearing compounds and nutrient supply to the plants from the soil are found in bilberry-dominated pine stands and wood sorrel-dominated spruce stands, which are noted for the highest productivity.

The structure of the nitrogen pool in soils under coniferous forests is highly stable: most nitrogen is found in the non-hydrolysable form accounting for at least 90%, whereas the share of labile forms does not exceed 10–12%. The structure of the soil nitrogen pool would not change fundamentally even upon thinnings or clear-cutting. Only total replacement of the phytocenosis can notably change the ratio of nitrogen compounds in the soil. Changes in the nitrogen pool under various ecological conditions are of quantitative nature, i.e. the amount of certain compounds changes, whereas their ratio remains nearly the same.

The quantities of labile nitrogen (mineral and hydrolysable) in soils vary over the growing season and in some years due to the meteorological conditions. The pattern of nitrogen seasonal dynamics in soils depends, however, also on the intensity of nitrogen assimilation by plants: unlike climax stands, middle-aged stands, where nitrogen is actively consumed, show a decrease in the element content in the soil by the middle and end of the growing season. All soils experience maximum nitrogen storage in autumn owing to the supply of fresh die-back. Labile nitrogen storage in soils of felled sites peaks in the period with the hydrothermal conditions most favourable for microorganisms responsible for nitrogen transformation in the soil, i.e. as a rule, the summer months.

Low share of labile nitrogen in the soil nitrogen pool results in low productivity of coniferous stands. The relationship between nitrogen amounts in the soil and stand productivity is very close in pine stand ecosystems (correlation coefficient 0.9), and less conspicuous in spruce stands (0.6).

Experiences involving application of mineral fertilizers to raise soil fertility and stand productivity have demonstrated that the demand for nitrogen

in coniferous stands is greater than the natural supply from the soil. Mineral fertilizers modify the ratio of nitrogen fractions in the soil, raising the amount of mineral nitrogen compounds for 2–3 years, after which it subsides to its former values.

Thus, the research has proved that soil is the principal nitrogen-bearing component in forest ecosystems, and the soil nitrogen pool zonal, ecological and temporal stability pre-determines the stability of the nitrogen biological cycle.



## Литература

*Абатуров Ю. Д.* О зависимости между бонитетом сосняков и содержанием в почве питательных веществ и влаги в лесах Ильменского заповедника // Тр. Ин-та биологии Уральского филиала АН СССР. Свердловск, 1961. Вып. 25, ч. 2. С. 59–67.

*Агроклиматические ресурсы Карельской АССР.* Л., 1974. 115 с.

*Азотфиксация в лесных биогеоценозах.* М., 1987. 148 с.

*Антропогенная динамика почв таежных экосистем.* Петрозаводск, 1992. 219 с.

*Арефьева З. Н.* Азотный режим лесных дерново-подзолистых почв тайги Зауралья // Лес и почва. Красноярск, 1968. С. 238–245.

*Арефьева З. Н., Колесников Б. П.* Динамика аммиачного и нитратного азота в лесных почвах Зауралья при высоких и низких температурах // Почвоведение. 1964. № 3. С. 30–45.

*Аристовская Т. В.* Микробиология процессов почвообразования. Л., 1980.

*Аристовская Т. В.* Численность, биомасса и продуктивность почвенных бактерий // Ресурсы биосферы. М., 1975. Вып. 1.

*Базилиевич Н. И.* Биогенные и абиогенные процессы в лесных, степных и пустынных экосистемах // Международная география-76. Биогеография и география почв. М., 1976. Т. 4. С. 58–62.

*Базилиевич Н. И.* Биогеохимия Земли и функциональные модели обменных процессов природных экосистем // Тр. лаб. биогеохимии ГЕОХИ АН СССР. Т. 17: Современные проблемы биосферы. М., 1979. С. 55–63.

*Базилиевич Н. И.* Иерархические концептуальные балансовые модели экосистем и почвы в связи с некоторыми аспектами эволюции биосферы // Моделирование биогеоценотических процессов. М., 1981. С. 69–85.

*Базилиевич Н. И., Родин Л. Е.* Продуктивность и круговорот элементов в естественных и культурных фитоценозах (по материалам СССР) // Биологическая продуктивность и круговорот химических элементов в растительных сообществах. М., 1971. С. 5–32.

*Белоногова Т. В.* Фитомасса живого покрова сосняков Южной Карелии // Лесные растительные ресурсы Южной Карелии. Петрозаводск, 1971. С. 106–110.

*Бискэ Г. С.* Четвертичные отложения и геоморфология Карелии. Петрозаводск, 1959. С. 106–110.

*Блэк К. А.* Растение и почва. М., 1973. 503 с.

*Бобрицкая М. А.* Поступление азота в почвы с атмосферными осадками в различных зонах европейской части СССР // Почвоведение. 1962. № 2. С. 53–60.

*Болотина Н. И.* О фракции легкогидролизуемого азота в мощном черноземе, ее состав и агрохимическое значение // Почвоведение. 1961. № 9. С. 79–82.

*Болотина Н. И., Абрамова Е. А.* О методике определения нитрификационной способности почв // *Агрохимия*. 1964. № 3. С. 110–117.

*Буаков П. С., Лубите Л. И.* Нитрификационная способность почв земель сельскохозяйственной части Красноярского края и влияние на них различных факторов // *Агрохимия*. 1969. № 1. С. 52–53.

*Будниченко Н. М.* Динамика общего и гидролизующего азота под жердняками сосны при внесении аммиачной селитры в почву // *Лесоведение и лесное хозяйство*. Минск, 1971. Вып. 4. С. 70–74.

*Букреева Н. Е.* Действие ванадия, титана и хрома на нитрифицирующую и аммонифицирующую способность почв // *Науч. тр. Свердл. пед. ин-та*. 1972. Вып. 161. С. 31–36.

*Бурсова А. И.* Влияние группово-выборочных рубок на свойства почвы ельника кисличного // *Тр. Всесоюз. заочн. лесотехн. ин-та*. 1959. Вып. 1. С. 49–59.

*Бухман В. А., Цыба М. М.* Агрохимические свойства и плодородие торфяных почв Карелии. Петрозаводск, 1967. 107 с.

*Вавуло Ф. П.* Микрофлора почв БССР // *Микрофлора почв северной и средней части СССР*. М., 1966. С. 114–136.

*Важенина Е. А.* Влияние техногенных выбросов через атмосферу на агрохимические свойства дерново-подзолистых почв // *Агрохимия*. 1983. № 5. С. 74–80.

*Вайцис М. В.* Генезис и свойства лесных почв южной Прибалтики. Вильнюс, 1975. 441 с.

*Васильева Г. В.* Влияние доз азотных удобрений и ингибитора нитрификации КМП на азотный режим торфяной низинной почвы, урожайность и качество многолетних злаковых трав: Автореф. дис. ... канд. с.-х. наук. СПб., 1993. 24 с.

*Виликайнен М. И., Зябченко С. С.* Рубки и восстановление сосновых лесов // *Сосновые леса Карелии и повышение их продуктивности*. Петрозаводск, 1974. С. 85–182.

*Волков А. Д.* Строение ельников южной части Карельской АССР // *Сб. науч.-исслед. работ ЛенНИИЛХ*. Вып. 11. М., 1967. С. 63–88.

*Володин А. М., Чесноков В. А.* Влияние осушения на почвы тяжелого механического состава южной Карелии // *Тез. докл. Всесоюз. науч. конф. «Агропочвоведение и плодородие почв»*. Л., 1986. С. 95.

*Гантимурова Н. И.* Микрофлора торфяно-болотных почв // *Микрофлора почв Западной Сибири*. Новосибирск, 1970. С. 149–170.

*Геология Карелии*. Л., 1987. 231 с.

*Герасимов И. П., Марков К. К.* Четвертичная геология (Палеогеография четвертичного периода). М., 1939. 365 с.

*Гильманов В. В., Базилович Н. И.* Количественная оценка источников гумусообразования русского чернозема (концептуально-балансовая модель) // *Вестн. Московск. ун-та. Сер. 17, почвоведение*. 1983. Вып. 1. С. 9–16.

*Гиляров М. С.* Зоологический метод диагностики почв. М., 1965. 202 с.

*Гиляров М. С., Стриганова Б. Р.* Роль почвенных беспозвоночных в разложении растительных остатков и круговороте веществ // *Зоология беспозвоночных*. Т. 5. М., 1978.

Говоренков Б. Ф. Круговорот элементов между растительностью и почвой в сосняке и лиственничнике на Карельском перешейке // География, генезис и плодородие почв. Л., 1972. С. 103–130.

Гришина Л. А. Гумусообразование и гумусное состояние почв. М., 1986.

Данилевич В. М., Цыба М. М. Влияние удобрений на микрофлору вновь осваиваемой торфяной почвы переходного типа болот КАССР // Изв. Карельского и Кольского филиалов АН СССР. 1959. Вып. 2. С. 93–99.

Добровольский Г. В., Гришина Л. А. Охрана почв. М., 1985. 224 с.

Дюшофур Ф. Основы почвоведения. Эволюция почв. М., 1970. 591 с.

Евдокимов И. В. Азот микробной биомассы в почве, его трансформация и использование растениями: Автореф. дис. ... канд. биол. наук. М., 1992. 17 с.

Евдокимова Г. А. Эколого-микробиологические основы охраны почв Крайнего Севера. Апатиты, 1995. 268 с.

Евдокимова Г. А., Кислых Е. Е., Морина Н. П. Биологическая активность почв в условиях аэротехногенного загрязнения на Крайнем Севере. Л., 1984. 120 с.

Егоров В. И. Свободноживущие азотфиксаторы подзолистых почв Кольского полуострова: Автореф. дис. ... канд. биол. наук. Кировск, 1979. 15 с.

Егорова Н. В. О сезонных изменениях химических свойств в почвах Южной Карелии // Тр. Карельского филиала АН СССР. 1958. Вып. 9. С. 163–185.

Егорова Н. В. Рационализация работ в базисных питомниках Карелии: Отчет за 1967 г. Петрозаводск, 1968.

Егорова Н. В., Куликова В. К. Влияние различных способов механизированных рубок леса на плодородие почв Южной Карелии // Плодородие почв Карелии. М., 1965. С. 144–158.

Егорова С. В., Каминская Т. А. Активность фиксации азота в песчаных почвах сосновых культур // Лесоведение. 1980. № 4. С. 71–73.

Еруков Г. В., Власкова Г. В. Гидротермический режим почв сосновых лесов Карелии. Л., 1986. 112 с.

Ершов В. В., Кузьмина Т. С. Микробиологические процессы в луговых почвах и изменение их под воздействием удобрений // Уч. зап. Петрозаводского гос. ун-та. С.-х. науки. 1965. Т. 13, вып. 2. С. 164–170.

Забелло К. Л. Динамика элементов почвенного питания сосновых насаждений на легких по механическому составу дерново-подзолистых почвах // Лес и почвы. Красноярск, 1968. С. 384–389.

Загуральская Л. М. Использование биохимических показателей для оценки степени техногенной деградации почв // Почвенные ресурсы Карелии, их рациональное использование и охрана. Петрозаводск, 1992. С. 132–142.

Загуральская Л. М. Микробиологические и биохимические свойства песчаных почв северной тайги и изменение их при вырубках // Влияние лесохозяйственных мероприятий на лесные почвы Карелии. Петрозаводск, 1983. С. 129–141.

Загуральская Л. М. Микробная трансформация органического вещества в лесных почвах Карелии. СПб., 1993. 136 с.

Загуральская Л. М. Разложение некоторых растений-торфообразователей в естественных условиях // Взаимоотношения леса и болота. М., 1967. С. 82–88.

*Загуральская Л. М., Клейн Л. А.* Некоторые параметры биологической активности почв и деструкции органического вещества в лесных экосистемах Карелии // Структурно-функциональная организация лесных почв среднетаежной подзоны Карелии (на примере заповедника «Кивач»). Петрозаводск, 1994. С. 75–91.

*Зайцев Б. Д.* Вопросы взаимоотношения между лесом и почвой в условиях Карелии // Лесные почвы Карелии и изменение их под влиянием лесохозяйственных мероприятий. Петрозаводск, 1962. С. 5–22.

*Захарченко М. Г.* Роль биологического азота в балансе питательных веществ в почве // Новое в изучении биологической фиксации азота. М., 1971. С. 139–145.

*Зименко Т. Г.* Микробиологические процессы в мелиорированных торфяниках Белоруссии и их направленное регулирование. Минск, 1977. 206 с.

*Зябченко С. С.* Природные особенности сосновых лесов // Сосновые леса Карелии и повышение их продуктивности. Петрозаводск, 1974. С. 31–71.

*Зябченко С. С.* Сосновые леса Европейского Севера. Л., 1984. 244 с.

*Иванчиков А. А.* Биохимическая и хозяйственная продуктивность сосняков Карелии // Лесные растительные ресурсы южной Карелии. Петрозаводск, 1971. С. 78–85.

*Исаяев В. И.* Поверхностный и внутрипочвенный сток на вырубках темнохвойных лесов Среднего Урала // Лесоведение. 1970. № 1. С. 69–74.

*Исламов С. С., Чундерова А. И.* Воздействие основных компонентов промышленного загрязнения атмосферы на активность несимбиотической азотфиксации в почве // Экология и физиология почвенных микроорганизмов. Л., 1976. С. 136–146.

*Казимиров Н. И., Волков А. Д., Зябченко С. С. и др.* Обмен веществ и энергии в сосновых лесах Европейского Севера. Л., 1977. 304 с.

*Казимиров Н. И., Куликова В. К., Новицкая Ю. Е.* Лесоводственная эффективность минеральных удобрений в лесах Карелии // Применение минеральных удобрений в лесном хозяйстве: Материалы науч.-координац. совещ. 25–27 марта 1974 г. Гомель, 1974а. С. 27–28.

*Казимиров Н. И., Куликова В. К., Новицкая Ю. Е.* Применение минеральных удобрений в еловых лесах Европейского Севера // Питание древесных растений и проблема повышения продуктивности лесов. Петрозаводск, 1972. С. 74–93.

*Казимиров Н. И., Лядинский А. Г., Преснухин Ю. В. и др.* Производительность сосновых насаждений по типам леса. Петрозаводск, 1990. 42 с.

*Казимиров Н. И., Медведева В. М., Морозова Р. М. и др.* Методические указания по системам применения удобрений на лесохозяйственных объектах. Петрозаводск, 1991. 45 с.

*Казимиров Н. И., Морозова Р. М.* Биологический круговорот веществ в ельниках Карелии. М., 1973. 174 с.

*Казимиров Н. И., Морозова Р. М., Куликова В. К.* Органическая масса и потоки веществ в березняках средней тайги. Л., 1978. 216 с.

*Казимиров Н. И., Морозова Р. М., Куликова В. К.* Применение удобрений в лесах Карелии. Петрозаводск, 1974б. 45 с.

Казимиров Н. И., Новицкая Ю. Е., Морозова Р. М. Биологические особенности, режим питания и продуктивность ели в Карелии // Состояние возобновления и пути формирования молодняков на концентрированных вырубках Северо-Запада Европейской части СССР: Тез. докл. к Всесоюз. совещ. Архангельск, 1971. С. 289–291.

Калмыков Г. С., Морина Л. Е. Влияние осушения и сельскохозяйственного освоения на микробиологическую активность торфяно-болотных почв Северо-Запада РСФСР // Микробиологические процессы в почвах и урожайность сельскохозяйственных культур. Вильнюс, 1978. С. 132–134.

Каменецкая И. В., Звoryкина К. В., Малышева Т. В. Продуктивность растительного покрова в некоторых типах молодых одновозрастных сосняков южной тайги // Продуктивность и структура растительности молодых сосняков. М., 1973. С. 5–62.

Карпачевский Л. О. Пестрота почвенного покрова в лесном биогеоценозе. М., 1977. 312 с.

Кацнельсон Р. С., Ершов В. В. Исследование микрофлоры целинных и окультуренных почв Карельской АССР // Микробиология. 1957. Т. 26, № 4. С. 468–476.

Кислых Е. Е. К методике фракционирования органического азота и оценке плодородия подзолистых почв // Органическое вещество в почвах Кольского полуострова. Апатиты, 1975. С. 92–105.

Кищенко Т. И., Козлов И. Ф. Леса Карельской АССР // Леса СССР. М., 1966. С. 157–196.

Ковда В. А. Основы учения о почвах. Т. 1. М., 1973.

Ковригин С. А. Динамика нитратов, аммония и подвижных форм фосфора и калия в почвах под различными древесными породами // Почвоведение. 1952. № 7. С. 628–642.

Козловская Л. С. Значение почвенных беспозвоночных в круговороте азота и углерода // Пути изучения и освоения болот Северо-Запада европейской части СССР. Л., 1974.

Козловская Л. С. Роль почвенных беспозвоночных в трансформации органического вещества в болотных почвах таежной зоны: Автореф. дис. ... докт. биол. наук. М., 1975.

Кореньков Д. А. Использование N 15 в исследованиях по превращению азота удобрений в почве // Результаты работ Центра опытной станции ВИУА за 1958–1966 гг.: Тр. ВИУА. 1968. Вып. 46. С. 143–165.

Коржицкий В. Д. Влияние верескового покрова в сосняках в связи с применением азотных удобрений // Повышение продуктивности хвойных лесов Карелии / Уч. зап. Петрозаводского гос. ун-та. 1975. Т. 22, вып. 3. С. 28–55.

Коржицкий В. Д., Куликова В. К. Влияние удобрений на развитие и рост сосны // Сосновые леса Карелии и повышение их продуктивности. Петрозаводск, 1974. С. 211–230.

Костина Н. В., Степанов А. Л., Умаров М. М. Влияние экологических факторов на восстановление закиси азота в почвах разных типов // Почвоведение. 1995. № 6. С. 3.



*Костылева Е. В.* Изменение органического вещества лесных почв под влиянием удобрений в культурах и естественных насаждениях сосны // Сб. науч. тр. ЛенНИИЛХ. Вып. 21. 1974. С. 51–59.

*Костылева Е. В.* Использование метода листового анализа при применении удобрений в лесных насаждениях // Тез. докл. Всесоюз. совещ. по вопросам питания древесных растений и повышения продуктивности насаждений. Петрозаводск, 1969. С. 105–106.

*Котева Т. В.* Процессы азотного цикла в серой лесной почве при внесении азотных удобрений и органического углерода: Автореф. дис. ... канд. биол. наук. М., 1993. 16 с.

*Кочуров Б. И.* Оценка устойчивости почв к загрязнению // География и природные ресурсы. 1983. № 4. С. 55–60.

*Кошельков С. П.* Возможности оценки снабжения древостоев сосны азотом по содержанию и запасам его в почве // Почвоведение. 1970. № 5. С. 75–84.

*Кошельков С. П.* Опыт применения листового анализа для изучения питания сосняков // Изв. высших учебных заведений. Лесн. журн. 1968. № 4. С. 152–153.

*Кошельков С. П.* Режим питания сосновых древостоев южной тайги // Лесоведение. 1967. № 4. С. 64–70.

*Красильников Н. А.* Микроорганизмы почвы и высшие растения. М., 1958.

*Кратиц К. О.* Геология карелид Карелии. М.; Л., 1963. 209 с.

*Кудяров В. Н.* Превращение азотных удобрений в дерново-подзолистой почве и доступность их растениям // Агрохимия. 1969. № 11. С. 3–14.

*Кудяров В. Н., Кузнецова Т. В.* Оценка размеров несимбиотической азотфиксации в почве методом баланса // Почвоведение. 1990. № 11. С. 79–89.

*Кудяров В. Н., Рынкс И. Н.* Диагностика азотного питания яровой пшеницы в условиях Иркутской области // Агрохимия. 1967. № 4. С. 13–21.

*Кудяров В. Н., Семенов В. М., Кузнецова Т. В., Мергель А. А.* Количественная оценка процессов азотного цикла при внесении возрастающих доз азотных удобрений // Агрохимия. 1992. № 2. С. 3–13.

*Куликова В. К.* Динамика подвижных форм элементов минерального питания в почвах еловых и березово-еловых насаждений в условиях Карелии // Лес и почва. Красноярск, 1968. С. 276–288.

*Куликова В. К.* Научный отчет «Научное обоснование к разработке мероприятий по ускоренному выращиванию древесных хвойных пород с применением удобрений в условиях Севера»: Рукопись // Фонды КарНЦ РАН. Ф. 5, оп. 6, ед. хр. 91. 1973. С. 164–397.

*Куликова В. К.* Пищевой режим почв. Научный отчет «Изучение обмена веществ и энергии в сосновых лесах южной Карелии»: Рукопись // Фонды КарНЦ РАН. Ф. 5, оп. 240. 1975. С. 184–204.

*Куликова В. К.* Сезонные изменения химических свойств подзолистых песчаных почв // Почвы сосновых лесов Карелии. Петрозаводск, 1978. С. 71–85.

*Куликова В. К., Егорова Н. В.* Состав органического вещества лесных подстилок некоторых почв Карелии // Плодородие почв Карелии. Петрозаводск, 1965. С. 47–55.



Куликова В. К., Кищенко И. Т. Сезонная динамика химических элементов в хвое и побегах сосны в зависимости от типа леса и внесения азотных удобрений. Петрозаводск, 1979. С. 82–104.

Куликова В. К., Морозова Р. М. Влияние лесохозяйственных мероприятий на плодородие подзолистых песчаных почв // Почвы сосновых лесов Карелии. Петрозаводск, 1978. С. 112–131.

Купревич В. Ф., Щербакова Т. А. Почвенная энзимология. Минск, 1966. 275 с.

Куракова Н. Г., Умаров М. М. Роль денитрификации в азотном балансе почв // Агрохимия. 1984. № 5. С. 118–129.

Курчева Г. Ф. Роль почвенных животных в разложении и гумификации растительных остатков. М., 1971.

Кутузова Р. С. Потери газообразного азота из дерново-подзолистой почвы разной окультуренности при денитрификации // Почвоведение. 1984. № 4. С. 92–97.

Кыдар М. М. О потенциальном плодородии подстилки различных типов местопроизрастания леса // Почвоведение. 1978. № 5. С. 115–124.

Кылли Р. К. Зольный состав лесных подстилок почв Эстонской ССР // Почвоведение. 1980. № 10. С. 112–121.

Кылли Р. К. О взаимоотношениях между растительностью и почвой в экосистемах на почвах буроземного и псевдоподзолистого типов // Сб. науч. тр. ЭСХА. Тарту, 1971. Вып. 75. С. 165–202.

Кылли Р. К., Ингермаа М. Запасы и состав опада и подстилок в некоторых типах произрастания леса // Сб. науч. тр. ЭСХА. Тарту, 1970. Вып. 65. С. 62–105.

Кылли Р., Кяхрик Р. Фитомасса и ее зольный состав в ельнике и сосняке кисличного типа произрастания леса // Сб. науч. тр. ЭСХА. Тарту, 1970. Вып. 65. С. 233–261.

Лазарева И. П. Варьирование агрохимических показателей пятнисто-подзолистой песчаной почвы // Плодородие почв сосновых лесов Карелии. Петрозаводск, 1979. С. 71–82.

Лазарева И. П., Зябченко С. С. Воздействие лесозаготовительной техники на почву при рубке сосновых лесов // Влияние хозяйственных мероприятий на лесные почвы Карелии. Петрозаводск, 1983. С. 112–129.

Ласкова Л. М. Структура, биомасса почвенной фауны и масса мицелия грибов в хвойных и березовых лесах заповедника «Кивач» // Структурно-функциональная организация лесных почв среднетаежной подзоны Карелии (на примере заповедника «Кивач»). Петрозаводск, 1994. С. 116–127.

Левкина Т. И. Сезонная динамика химических свойств почв под ельником черничным и березняком разнотравным заповедника «Кивач» // Тр. Карельского филиала АН СССР. 1962. Вып. 34. С. 23–50.

Левкина Т. И., Яковлев Ф. С. Взаимоотношение растительности и почв в ельниках заповедника «Кивач» // Плодородие почв Карелии. М.; Л., 1965. С. 5–19.

Ляпунов А. А., Титлянова А. А. Системный подход к изучению круговорота веществ и потока энергии в биогеоценозе // О некоторых вопросах кодирова-

ния и передачи информации в управляющих системах живой природы. Новосибирск, 1971. С. 99–188.

*Макарова А. П., Напрасникова Е. В.* Микрофлора подстилок в хвойных лесах северного Забайкалья // Биологические науки. 1984. № 4. С. 94–97.

*Мананов К. Н.* Продуктивность и биологический круговорот в тундровых биогеоценозах Кольского полуострова. Л., 1973. 148 с.

*Марченко А. И.* Почвы Карелии. М.; Л., 1962. 310 с.

*Медведева В. М., Корнилова Л. И., Вайнблат В. З.* Лесорастительные свойства почв заболоченных сосняков // Плодородие почв сосновых лесов Карелии. Петрозаводск, 1979. С. 49–71.

*Митрофанов Д. П.* Химический состав лесных растений Сибири. Новосибирск, 1977. 120 с.

*Мишустин Е. Н.* Микроорганизмы и плодородие почвы. М., 1956. 247 с.

*Молчанов А. А.* Влияние минеральных удобрений на рост дуба // Лесное хозяйство. 1964. № 4. С. 17–20.

*Молчанов А. А.* Продуктивность органической массы в лесах различных зон. М., 1971. 276 с.

*Молчанов А. А.* Продуктивность органической массы в сосняках брусничных // Продуктивность органической и биохимической массы леса. М., 1974. С. 16–23.

*Морозов Г. Ф.* Учение о лесе. Избр. тр. Т. I. М., 1970. 458 с.

*Морозова И. Г.* Условия азотного питания сосновых молодняков на дерново-слаборазвитых песчаных почвах Приднестровья // Лесоводство и агролесомелиорация. 1967. Вып. 10. С. 70–76.

*Морозова Р. М.* Запас и зольный состав лесных подстилок в еловых насаждениях // Почвенные исследования в Карелии: Материалы к 10 междунар. конгр. почвоведов. Петрозаводск, 1974. С. 119–142.

*Морозова Р. М.* Изменение процесса почвообразования под влиянием концентрированных рубок леса // Возобновление леса на вырубках и выращивание сеянцев в питомниках. Петрозаводск, 1964а. С. 55–73.

*Морозова Р. М.* К характеристике запасов и состава гумуса в почвах Карельской АССР // Почвоведение. 1959. № 10. С. 79–87.

*Морозова Р. М.* К характеристике свойств гуминовых и фульвокислот почв Карелии // Изв. Карельского и Кольского филиалов АН СССР. 1958. Вып. 3. С. 87–95.

*Морозова Р. М.* Лесные почвы Карелии. Л., 1991. 184 с.

*Морозова Р. М.* Особенности почвообразовательного процесса на различных стадиях восстановления ельников черничных после рубки. Петрозаводск, 1964б. С. 74–87.

*Морозова Р. М.* Химический состав растений еловых и березовых лесов Карелии // Лесные растительные ресурсы южной Карелии. Петрозаводск, 1971. С. 57–66.

*Морозова Р. М., Володин А. М., Федорченко М. В. и др.* Почвы Карелии. Петрозаводск, 1981. 192 с.

*Морозова Р. М., Данилевич В. М.* Биологическая активность песчаных подзолов // Плодородие почв сосновых лесов Карелии. Петрозаводск, 1979. С. 172–192.

Морозова Р. М., Куликова В. К., Данилевич В. М. Влияние удобрений на изменение химических свойств почв ельника черничного // Удобрения и гербициды в лесном хозяйстве Европейского Севера СССР. Л., 1971. С. 3–18.

Морозова Р. М., Лазарева И. П. Лесорастительные свойства почв сосновых лесов // Плодородие почв сосновых лесов Карелии. Петрозаводск, 1979. С. 5–48.

Морозова Р. М., Федоренко Н. Г. Современные процессы почвообразования в хвойных лесах Карелии. Петрозаводск, 1992. 284 с.

Най П. Х., Тинкер П. Б. Движение растворов в системе почва – растение. М., 1980. 365 с.

Никифорова Л. И. Агрохимические методы исследования обеспеченности почв азотом и их применимость в различных почвенно-климатических условиях // Агрохимия. 1974. № 2. С. 136–151.

Новицкая Ю. Е., Чикина П. Ф. Азотный обмен у сосны на Севере. Л., 1980. 166 с.

Орлов А. Я., Кошельков С. П. Почвенная экология сосны. М., 1971. 324 с.

Орлов А. Я., Орлова Л. М. Содержание микроэлементов в почве и хвое основных типов сосновых лесов южной тайги // Агрохимия. 1966. № 4. С. 86–97.

Орлов Д. С. Гумусовые кислоты почв. М., 1974. 332 с.

Орлов Д. С. Гумусовые кислоты почв и общая теория гумификации. М., 1990. 325 с.

Орлов Д. С. Химия почв. М., 1985. 376 с.

Орлов Д. С., Бирюкова О. Н., Садовникова Л. К., Фридланд Е. Ф. Использование группового состава гумуса и некоторых биохимических показателей для диагностики почв // Почвоведение. 1979. № 4. С. 10–22.

Орлов Д. С., Садовникова Л. К. Содержание и распределение углеводов в главнейших типах почв СССР // Почвоведение. 1975. № 8. С. 81–90.

Орфанитский Ю. А., Орфанитская В. Г. Почвенные условия таежных вырубок. М., 1970. 97 с.

Орфанитский Ю. А., Федченко М. А., Ардашев М. Я. Об аммонификации и нитрификации в почвах некоторых типов вырубок Архангельской области // Почвоведение. 1960. № 10. С. 79–85.

Оуэн Д. Б. Сборник статистических таблиц. М., 1973. 510 с.

Паршевников А. Л. Изменение зольного состава хвои с возрастом в некоторых типах еловых лесов // Ботан. журн. 1959. Т. 44, № 2. С. 28–31.

Паршевников А. Л. Круговорот азота и зольных элементов в связи со сменой пород в лесах средней тайги // Тр. Ин-та леса и древесины. Т. 52: Типы леса и почвы северной части Вологодской области. М.; Л., 1962. С. 196–209.

Переверзев В. Н. Роль органического вещества и азота в почвообразовании и плодородии почв на Крайнем Севере: Автореф. дис. ... докт. с.-х. наук. Л.; Пушкин, 1985. 32 с.

Переверзев В. Н., Головкин Э. А., Алексеева Н. С. Биологическая активность и азотный режим торфяно-болотных почв в условиях Крайнего Севера. Л., 1970. 98 с.

Перельгин В. М., Перцовская А. Ф., Григорьева Т. И. и др. Оценка различных показателей, характеризующих биологические процессы в почве в связи

с нормированием вредных химических веществ // Свинец в окружающей среде: Гигиенические аспекты. М., 1978. С. 26–31.

*Перцовская А. Ф., Тонкопий Н. И., Григорьева Т. И.* Влияние антропогенных загрязнений на микроорганизмы и биологическую активность почвы // Изв. АН СССР. Сер. биол. 1985. Вып. 6. С. 913–921.

*Перцовская А. Ф., Тонкопий Н. И., Григорьева Т. И.* Влияние некоторых химических веществ на микроорганизмы в почве // Микробиологические методы борьбы с загрязнением окружающей среды. Пушино-на-Оке, 1975. С. 107–108.

*Петров-Спиридонов А. А.* Поступление азота в лесные экосистемы южной тайги // Лесоведение. 1985. № 4. С. 41–46.

*Побединский А. В.* Водоохранная и почвозащитная роль лесов. М., 1979. 173 с.

*Побединский А. В.* Изменение лесорастительной среды под влиянием тракторной трелевки // Лесное хозяйство. 1952. № 3. С. 34–39.

*Побединский А. В.* Рубки главного пользования. М.; Л., 1961. 146 с.

*Побединский А. В.* Рубки главного пользования. М., 1980. 192 с.

*Побединский А. В.* Рубки и возобновление в таежных лесах СССР. М., 1973. 200 с.

*Победов В. С.* Исследование и обоснование применения минеральных удобрений в интенсивном лесном хозяйстве: Автореф. дис. ... докт. с.-х. наук. М., 1981. 38 с.

*Победов В. С., Булавик И. М.* Азотный режим почв в некоторых типах сосняков после внесения аммиачной селитры // Лесоведение и лесное хозяйство. Вып. 11. Минск, 1976. С. 59–66.

*Победов В. С., Волчков В. Е.* Влияние азотного удобрения на содержание питательных элементов в почве, подстилке и хвое приспевающего соснового насаждения // Новое в лесоводстве. Минск, 1969. С. 6–11.

*Победов В. С., Волчков В. Е.* Диагностика режима минерального питания и применение удобрений в сосновых лесах БССР // Питание древесных растений и проблемы повышения продуктивности лесов. Петрозаводск, 1972. С. 34–46.

*Победов В. С., Прокшин Д. Н., Четвериков А. В.* Вынос питательных веществ сеянцами из почвы лесных питомников // Лесохозяйственная наука и практика. Вып. 20. Минск, 1970. С. 39–45.

*Победов В. С., Шиманский П. С., Волчков В. Е.* Применение минеральных удобрений в лесном хозяйстве. М., 1977. 34 с.

*Поздняков Л. К., Протопопов В. В., Горбатенко С. М.* Биологическая продуктивность лесов средней Сибири и Якутии. Красноярск, 1969. 176 с.

*Попова Э. П.* Азот в лесных почвах. Новосибирск, 1983. 137 с.

*Попова Э. П., Лубите Я. И.* Биологическая активность песчаных подзолов // Плодородие почв сосновых лесов. Петрозаводск, 1979. С. 172–192.

*Поргасаар В. И.* Диагностика минерального питания сосны обыкновенной // Агрохимия. 1977. № 5. С. 120–127.

*Поргасаар В. И.* Химический состав хвои сосны при разных условиях питания // Изв. АН ЭССР. Сер. биол. 1966. Вып. 2. С. 231–237.

Прянишников Д. Н. Азот в жизни растений и земледелии СССР. М., 1945. 197 с.

Пятецкий Г. Е., Морозова Д. М. Изменение физических и химических свойств лесных почв южной Карелии в связи с вырубками леса // Лесные почвы Карелии и изменение их под влиянием лесохозяйственных мероприятий. Петрозаводск, 1962. Вып. 34. С. 71–92.

Работнов Т. А. Азот в наземных биогеоценозах // Структурно-функциональная организация биогеоценозов. М., 1980. С. 69–90.

Раменская М. Л. Луговая растительность Карелии. Петрозаводск, 1958. 400 с.

Рева М. Л., Филатова Р. Я. Влияние промышленных пылевых выбросов на почву // Экологические проблемы сельского хозяйства: Материалы 1-й Всесоюз. методол. школы-симпозиума. М., 1978. С. 124–125.

Ремезов Н. П. Аммонификация и нитрификация в лесных почвах // Исследования по лесному почвоведению. ВНИИЛМ. 1941. Т. 1, вып. 24. С. 89–128.

Ремезов Н. П. Роль биологического круговорота в почвообразовании под пологом леса // Почвоведение. 1956. № 7. С. 68–79.

Ремезов Н. П. Условия азотного питания в сосняках // Сов. ботаника. 1938. № 6. С. 34–50.

Ремезов Н. П., Быкова Л. Н., Смирнова К. М. Потребление и круговорот азота и зольных элементов в лесах Европейской части СССР. М., 1959. 282 с.

Роговой П. П. Плодородие почв — основа продуктивности лесов // Пути повышения продуктивности лесов: Материалы Всесоюз. совещ. по повышению продуктивности лесов. Минск, 1966. С. 24–37.

Родин Л. Е., Базилевич Н. И. Динамика органического вещества и биологический круговорот в основных типах растительности. М.; Л., 1965. 253 с.

Рыдалевская И. А., Терешенкова И. А. Сравнительное изучение некоторых методов определения подвижных форм азота в почве // Агрохимия. 1965. № 8. С. 124–132.

Рэуце Т., Кырстя С. Борьба с загрязнением почвы. М., 1986. 222 с.

Сапожников И. А. Азот в земледелии Нечерноземной полосы. Л., 1973. 331 с.

Саценикс Р. Я., Капост В. Я. Минеральные удобрения в лесном хозяйстве Латвии // Лесное хозяйство. 1975. № 10. С. 41–44.

Селезнев Е. С., Дроздова В. М. О естественном фоне загрязнения атмосферы и составе осадков на территории СССР // Современные проблемы климатологии. Л., 1966. 314 с.

Семенов В. М., Мерель А. А., Розанова Л. Н. и др. Количественная оценка процессов азотного цикла при внесении возрастающих доз азотных удобрений // Агрохимия. 1992. № 5. С. 3–10.

Сляднев А. П. Влияние аммиачной селитры на рост сосновых жердняков // Лесное хозяйство. 1968. № 8. С. 43–45.

Сляднев А. П. Комплексный способ выращивания сосновых насаждений. М., 1971. 104 с.

*Смагина М. В.* Микроорганизмы и экологические особенности трансформации органического вещества в осушаемых болотных лесах: Автореф. дис. ... канд. биол. наук. Красноярск, 1988. 18 с.

*Смирнов В. В.* Органическая масса в некоторых лесных фитоценозах европейской части СССР. М., 1971. 362 с.

*Смолянинов И. И.* Биологический круговорот и повышение продуктивности лесов. М., 1969. 192 с.

*Солнцев З. Я.* Опыт применения группово-выборочных рубок при реконструкции лесов зеленой зоны // Тр. Всесоюз. заоч. лесотехн. ин-та. 1955. Вып. 1. С. 129–137.

*Сорокин Н. Д.* Экологические закономерности развития микрофлоры в почвах южной тайги Средней Сибири: Автореф. дис. ... докт. биол. наук. Красноярск, 1990. 38 с.

*Степанов Н. Н.* Значение минерализации опадающей листвы и хвои в поднати производительности почвы // На лесокультурном фронте. 1932. № 4–5.

*Стефурак В. П.* Влияние техногенного загрязнения на численность и состав микробных сообществ почв // Структура и функции микробных сообществ почв с различной антропогенной нагрузкой. Киев, 1982. С. 230–231.

*Стратонович А. И., Костылева Е. В., Дмитриева А. А.* Мероприятия по улучшению условий выращивания посадочного материала в лесных питомниках Ленинградской и Новгородской областей. Л., 1962. 30 с.

*Стриганова Б. Р.* Питание почвенных сапрофагов. М., 1980.

*Судницына Т. Н.* К вопросу об оценке азотного питания сосновых насаждений Серебряноборского опытного лесничества // Леса Подмосквья. М., 1965. С. 61–68.

*Судницына Т. Н.* Некоторые закономерности накопления азота в сосне // Лесоведение. 1972. № 6. С. 61–68.

*Титлянова А. А., Базилевич Н. И.* Функциональная модель обменных процессов травяных биогеоценозов стационара Караги // Ресурсы биосферы. Продуктивность степных, луговых и болотных сообществ. Л., 1975. Т. 1. С. 77–85.

*Ткаченко М. Е.* Леса России. СПб., 1922. 36 с.

*Травяев А. П.* О разложении лесной подстилки в зависимости от типологических особенностей искусственных лесов в степи // Науч. зап. Днепрпетровского гос. ун-та. 1960. Т. 62.

*Третьякова Е. П.* Влияние температуры на процессы аммонификации в подзолистых почвах Крайнего Севера // Почвоведение. 1977. № 6. С. 158–162.

*Трутнев А. Г., Скрипкина А. Н.* Разложение лесных подстилок в почве // Почвоведение. 1947. № 3. С. 183–187.

*Турчин Ф. В.* Азотное питание растений и применение азотных удобрений // Изб. тр. М., 1972. 335 с.

*Турчин Ф. В.* Использование азотных удобрений урожаем и их превращение в почве // Журн. Всесоюз. химич. об-ва им. Д. И. Менделеева. 1965. Т. 10, вып. 10. С. 400–407.



Турчин Ф. В. Превращение азотных удобрений в почве и усвоение их растениями // *Агрохимия*. 1964. № 3. С. 3–18.

Турчин Ф. В. Роль минерального и биологического азота в земледелии СССР // *Почвоведение*. 1956. № 6. С. 14–24.

Тюрин И. В. О количественном участии живого вещества в составе органической части почв // *Почвоведение*. 1946. № 1.

Тюрин И. В. Плодородие почв и проблема азота в почвоведении и земледелии // *Органическое вещество почвы и его роль в плодородии*. М., 1965. 320 с.

Тюрин И. В., Кононова М. М. О методах определения потребности почв в азоте // *Тр. Ин-та им. В. В. Докучаева*. М.; Л., 1935. Т. 7. С. 159–189.

Тюрин И. В., Кононова М. М. О новом методе определения потребности почв в азоте // *Тр. Ин-та им. В. В. Докучаева*. 1934. Т. 10, вып. 4. С. 49–56.

Тягны-Рядно М. Г. Влияние механизированных способов рубок леса на микробиологические процессы: Сводный отчет за 1959 г. по теме «Теоретическое обоснование и разработка рациональных способов рубок ухода в елово-лиственных молодняках на базе использования механизмов» // *Фонды КарНЦ РАН*. Ф. 5, оп. 6, ед. хр. 14. 132 с.

Узун В. Ф., Алексеева А. Н. Нитрификационная способность почв сосновых лесов Саратовской области // *Агрохимия*. 1974. № 2. С. 29–30.

Умаров М. М., Азиева Е. Е. Некоторые биохимические показатели загрязнения почв тяжелыми металлами // *Тяжелые металлы в окружающей среде*. М., 1980. С. 109–115.

Федорец Н. Г. Аммонифицирующая и нитрифицирующая способность почв некоторых типов сосновых лесов Карелии // *Науч. тр. Ленинград. с.-х. ин-та*. 1978. С. 56–67.

Федорец Н. Г. Влияние азотных удобрений на химические свойства почв сосновых лесов // *Влияние хозяйственных мероприятий на лесные почвы Карелии*. Петрозаводск, 1983. С. 77–88.

Федорец Н. Г. Временная изменчивость действия азотных удобрений на содержание азота в почвах сосновых лесов // *Генезис и свойства песчаных почв Карелии*. Л., 1982. С. 95–103.

Федорец Н. Г. Почвенные условия вырубок Карелии последнего десятилетия // *Вопросы лесовосстановления и лесозащиты в Карелии*. Петрозаводск, 1983. С. 4–13.

Федорищак М. Р. Антропогенные изменения почв в зоне влияния металлургических заводов // *Почвоведение*. 1978. № 11. С. 133–137.

Федорова Е. Л., Шумаков В. С. Свойства лесных подстилок в культурах тополя // *Сб. науч. тр. по лесному почвоведению*. М., 1973. С. 161–172.

Фирсова В. П. Почвы таежной зоны Урала и Зауралья. М., 1977. 175 с.

Чегринцев Г. Я., Безбородько М. Д., Воронова Г. Ф., Никуля Р. Г. Состояние биологической активности почвы как показатель при нормировании экзогенных химических веществ в почве // *Гигиена населенных мест*. Киев, 1980. Вып. 19. С. 100–105.

Чепурко Н. А. Биологическая продуктивность и круговорот химических элементов в лесных и тундровых сообществах Хибинских гор // *Биологичес-*

кая продуктивность и круговорот химических элементов в растительных сообществах. Л., 1971. С. 213–219.

*Чертов О. Г.* Экология лесных земель. Л., 1981. 192 с.

*Четвертичные отложения* Финляндии и Северо-Запада Российской Федерации и их сырьевые ресурсы. Карта М 1 : 1 000 000. Под ред. И. М. Экмана, А. Д. Лукашова, Й. Низмеля. Хельсинки, 1993.

*Шахова Н. М., Шилова Е. И.* Влияние атмосферных осадков на качественный состав лизиметрических растворов песчаной подзолистой почвы // Почвенные исследования в Карелии. Петрозаводск, 1974. С. 162–168.

*Шилова Е. И., Банкина Т. А.* Основы учения о биосфере. СПб., 1994. 197 с.

*Шконде Э. И.* О применимости метода Корнфилда для определения потребности почв в азотных удобрениях // Химия в сельском хозяйстве. 1971. № 12. С. 50–60.

*Шконде Э. И., Королева И. Е.* Формы азота и методы его определения // Удобрения и урожай на Полесье. Киев, 1965. С. 329–343.

*Шоба С. А.* Морфогенез почв лесной зоны: Автореф. дис. ... докт. биол. наук. М., 1988.

*Шубин В. И.* Микотрофность древесных пород. Л., 1973. 262 с.

*Шубин В. И., Данилевич В. М.* Изменение микрофлоры почвы лесных питомников под влиянием удобрений // Почвы Карелии и пути повышения их плодородия. Петрозаводск, 1971. С. 235–250.

*Шумаков В. С.* Азотный режим почвы в двух типах соснового леса // Сб. работ по лесному хозяйству Всесоюз. ин-та лесоводства и механизации лесного хозяйства. М., 1958. Вып. 35. С. 161–170.

*Шумаков В. С.* Влияние азотных удобрений на изменение свойств дерново-подзолистых почв при компостировании // Применение удобрений в лесном хозяйстве: Материалы науч.-координац. совещ. Гомель, 1974. С. 38–41.

*Шумаков В. С.* Достижения и проблемы применения минеральных удобрений в лесном хозяйстве СССР // Агрохимия. 1972. № 7. С. 145–153.

*Шумаков В. С.* О причинах, задерживающих нитрификацию в лесных почвах // Почвоведение. 1948. № 4. С. 227–237.

*Шумаков В. С., Федорова Е. Л.* Применение минеральных удобрений в лесу. М., 1970. 89 с.

*Шербакова Т. А., Максимова В. П., Галушко Н. А.* Выделение из почвы ферментного комплекса, обладающего амилалитической активностью // Докл. АН БССР. 1970. Т. 14, вып. 6. С. 661–663.

*Юркевич И. Д., Ярошевич Э. П.* Биологическая продуктивность типов и ассоциаций сосновых лесов. Минск, 1974. 296 с.

*Юрко Е. П.* Определение степени обеспеченности растений азотом на черноземах // Химия в сельском хозяйстве. 1972. № 2. С. 63–68.

*Юшкевич И. А., Туренков Н. И., Алексейчик И. А.* Поступление азота, фосфора и калия с атмосферными осадками в Белоруссии // Почвоведение. 1971. № 1. С. 70–74.

*Яковлев Ф. С., Воронова В. С.* Типы лесов Карелии и их природное районирование. Петрозаводск, 1959. 190 с.

- Badura L., Galimska-Stypa R., Mrozowska I.* Wplyw cynku i miedzi na zmyany ilosciowe i jakosciowe zecpolow bakterii glebowych w badaniach modelowych // *Acta Biologica*. Katowice, 1977. T. 4. S. 7–29.
- Baule H.* World-wide use fertilizer in forestry at present and in the near future // *S. Afr. J.* 1975. 194. P. 13–19.
- Benzing-Purdie M. L., Ripmeester J. A., Preston C. M.* Elucidation of the nitrogen forms in melanoidins and humic acids by nitrogen-15 cross polarization-magic angle spinning nuclear magnetic resonance // *J. of Agriculture and Food Chemistry*. 1983. 31. P. 913–915.
- Bollag J. M., Barabas Z. W.* Effect of heavy metals on the denitrification process in soil // *Environ. Qual.* 1979. V. 8. 2. P. 196–201.
- Bremner J.* Studium on soil organic matter. The chemical nature of soil organic nitrogen // *J. Agric. Sci.* 1949. V. 38. 183 p.
- Chao W. I., Gan K. D., Chao C. C.* Nitrification and nitrifying potential of tropical and subtropical soils // *Biol. Fertil. Soils*. 1993. 15. 2. P. 87–90.
- Cornfield A. H.* Ammonia release an the treating soils with sodium hydroxide as a possible means of predicting the nitrogen supplying power of soils // *Nature*. 1960. V. 187. 4733. P. 260–261.
- Davis I., Schober A., Bahn M.* Svein björnsson // *Arct. and Alp. Res.* 1991. 23. 3. P. 279–286.
- Eisenhart M.* Eigenschaften und Belastbarkeit der Boden durch Emmissionen aus der Luft // *Agrar. Budsch.* 1983. 4. S. 29.
- Ellert B. N., Bettany J. R.* Calculation of organic matter and nutrients stored in soils under contrasting management regimes // *Can. J. Soil Sci.* 1995. 75. P. 529–538.
- Ellert B. N., Gregorich E. G.* Storage of carbon, nitrogen and phosphorus in cultivated and adjacent forested soils of Ontario // *Soil Science*. 1996. V. 161, N 9. P. 587–603.
- El-Shinnawi M. M., Omran M. S.* Effect of different levels of trace element nutrition mixture on organic matter decomposition and the number of certain heterotrophs in soil // *Rostlinna Vyroba*. 1976. T. 22. 1. S. 389–394.
- Emmet B. A., Reyholds B., Stevens P. A. et al.* Nitrate leaching (from afforested Welsh catchments – interactions between stand age and nitrogen deposition // *Ambio*. 1993. 22. 6. P. 386–394.
- Erte G.* Hauptziel ist sanieren und revitalisieren // *Osten. Forst.* 1994. 105. 4. S. 57–58.
- Ford C.* The effects of acid precipitation on the soil // *Agr. Forestry Bull.* 1980. V. 34. P. 24–25.
- Giashuddin M., Cornfield A. N.* Effect of adding nickel (as oxide) to soil on nitrogen and carbon mineralisation at different pH values // *Environ. Pollut.* 1979. V. 19. P. 67–70.
- Glass N. E., Glass C. E., Rennie P. J.* Effect of acid precipitation on water, soil and plants. *Environ* // *Sci. and Technol.* 1979. V. 13. 11. P. 1350–1355.
- Granhall U., Lindberg T.* Nitrogen fixation in some coniferous forest ecosystems // *Ecol. Bull.* 1978. 26. P. 178–192.

*Harris M. M., Riha S. I.* Carbon and nitrogen dynamics in forest floor during short-term laboratory incubations // *Soil Biol. and Biochem.* 1991. 23. 1. P. 1035–1041.

*Hoffmann G.* Über Beziehungen zwischen Vegetationseinheit, Humusform, C/N Verhältnis und pH-Wert des Oberbodens in Kiefernbeständen des nordostdeutschen Tiefland // *Arch. Forstw.* 1968. Bd. 17, N 8. S. 845–855.

*Holmen H.* Skögs godsling i Sverige // *Vaxt-naringsnytt.* 1968. 2. S. 28–32.

*Höhne H., Fiedler H.* Beitrag zur Stickstoffdüngung mittelalter Kiefernbestände. III (Beziehungen zwischen Wachstum und Ernährung in ersten Nachwirkungsjahr einer dreijährigen N-Düngung) // *Arch. Forstwesen.* 1967. 16. S. 487–507.

*Huang C.-V., Bazzaz F. A., Van der Hoef L. N.* The inhibition of soybean metabolism of cadmium and lead // *Plant and Soil.* 1974. V. 54. 1. P. 122–127.

*Hunger W., Fiedler H.* Düngungsdiagnosen für ältere Fichtenbestände des Erzgebirges und Vogtlandes / II Wachstum und Ernährung der Fichte // *Arch. Forstwesen.* 1965. Bd. 14. 3. S. 963–986.

*Ingestad T.* Studies on the nutrition of forest tree seedlings XXX. Mineral nutrition of pine // *Physiol. Plantarum.* 1960. 13. 3. P. 513–535.

*Keipi K., Kekkonen O.* Calculation concerning fitability of forest fertilization // *Folia forest.* 1970. 84. 23 p.

*Kniker H.* Quantitative  $^{15}\text{N}$ - und  $^{13}\text{C}$ -CPMAS-Festkörper und  $^{15}\text{N}$  Flüssigkeits-NMR-Spektroskopie an Pflanzenkomposten und natürlichen Böden. PhD Thesis. Universität Regensburg. Germany. 1993.

*Kniker H., Fründ R., Lüdemann H.-D.* The chemical nature of nitrogen in soil organic matter // *Naturwissenschaften.* 1993. 80. P. 219–221.

*Kniker H., Hatcher P. G., Scaroni A. W.* Solid-State  $^{15}\text{N}$  NMR spectroscopy of coal // *Energy and Fuels.* 1995. 9. P. 999–1002.

*Kniker H., Lüdemann H.-D.* N-15 and C-13 CPMAS and solution NMR studies of N-15 enriched plant material during 600 days of microbial degradation // *Organic Geochemistry.* 1995. 23. P. 329–341.

*Kniker H., Schmidt M. W. I., Kogel-Knabner I.* Nature of organic nitrogen in fine particle size separates of sandy soils of highly industrialized areas as revealed by NMR spectroscopy // *Soil Biology and Biochemistry.* 2000. 32. P. 241–252.

*Kusel K., Drake H. L.* Microbial turnover of low molecular weight organic acids during leaf litter decomposition // *Soil Biology and Biochemistry.* 1999. 31. P. 107–118.

*Lau W. M., Mainwaring S. J.* The determination of soil sensitivity to acid deposition // *Water, Air and Soil Pollut.* 1985. V. 25. 4. P. 451–464.

*Lek S., Delacoste M., Baran P. et al.* Application of neural network for nonlinear modeling in ecology // *Ecological Modelling.* 1996. 90. P. 39–52.

*Lowry G. L.* Black spruce site quality as related to soil and other site conditions // *Soil. Sci. Soc. Amer. Proc.* 1975. V. 39, N 1. P. 125–131.

*Mäkipää R.* Effects of nitrogen fertilization on the humus layer and ground vegetation under closed canopy in boreal coniferous stands // *Silva fennica.* 1994. 28. P. 81–94.

*Mälikönen E.* Annual primary production and nutrient cycle in some Scots pine stands // *Commun. Inst. For. Fenn.* 1974. 84. 87 p.

*Mälkönen E.* Management of nutrition in forest under stress (Eds. Zoetl, H. W. and Huettl R. F.). Kluwer Academic Publishers, 1991. 668 p.

*Miller C. S.* Decomposition of coniferous leaf litter // *Biology of plant litter decomposition*. London, New York, 1974. V. 1. P. 105–128.

*Minnich M. M., Mc Bride M. B.* Effect of copper activity on carbon and nitrogen mineralisation in field-aged copper – enriched soils // *Plant and Soil*. 1986. V. 91. 2. P. 231–240.

*Monserud R. A., Onuchin A. A., Tchepakova N. M.* Needle, crown, stem, and root phytomass of *Pinus sylvestris* stands in Russia // *Forest Ecology and Management*. 1996. 82. P. 59–67.

*Moore A. W.* Non-symbiotic nitrogen fixation in soil and soil-plant systems // *Soil and Fert*. 1966. V. 29. 2. P. 113–128.

*Nebe W., Beness.* Über Standort Höhen wachstum und Ernährungs zu stand optimal wachender Fichtenbestände des Beskiden des Bohmer Waldes und Erzgebirges // *Arch. Forstwesen*. 1965. Bd. 14. 9.

*Ovington J. D.* Nutrient cycling in woodlands // *Experimental pedology* / Ed. E. V. Hallsworth, D. V. Grawford. London, 1965.

*Ovington J. D.* Quantitative ecology and the woodland ecosystem concept // *Advanced Ecological Res*. 1972. V. 1. P. 103–192.

*Pettersson Folke.* Predictive functions for impact of nitrogen fertilization on growth over five years // *Rept. Skog. Forsk*. 1994a. 3. P. 1–56.

*Pettersson Folke.* Predictive functions for calculating the total response in growth to nitrogen fertilization duration and distribution over time // *Rept. Skog. Forsk*. 1994b. 4. P. 1–34.

*Poikolainen J., Lippo H.* The effect of the emission of the Kostomuksha Mining Complex on the chemical composition of deposition and soil water in the surrounding pine forest // *Water, Air and Soil Pollut*. 85: 1689–1694, 1995.

*Premi P. R., Cornfield A. M.* Effect of addition of copper, manganese, zinc and chromium compounds on ammonification and nitrification during incubation of soil // *Plant and soil*. 1969. V. 31. P. 345–352.

*Rashid G. H., Sehlfner R.* Seasonal variation in the nitrogen mineralization and mineral nitrogen accumulation in two temperate forest soils // *Pedobiologia*. 1988. V. 31. 5–6. P. 381–390.

*Rehfuess K. E., Moll W.* Orientierende Untersuchungen über den Ernährungs zu stand von Fichtenbestände auf Hungmorane in Oberschwaben // *Allgem. Forst und Fagdzeitung*, 1965. Bd. 136. 9.

*Ring E.* Soil-water chemistry in Swedish coniferous forests 1987–92 // *Rept. Skog. Forsk*. 1993. 6. P. 1–32.

*Rother J. H., Millbank J., Thornton J.* Effects of heavy-metal additions on ammonification and nitrification with cadmium, lead and zinc // *Plant and soil*. 1982. V. 69. 2. P. 239–258.

*Saad O. A. Z. O., Conrad R.* Temperature dependence of nitrification, denitrification and turnover of nitric oxide in different soils // *Biology and Fertility Soils*. 1993. 15. P. 21–27.

*Salonen K.* Evolution of forest fertilisation in Finland // *Collog. Forest Fertil*. Yvaskyla, s. 1., s. a., 1967. P. 39–40.



- Selmer-Olsen A. R.* Influence of heavy metal pollution on nitrogen mineralisation in soils. 2. Effects of mercury // *Meld. Norg. landbrukshogak.* 1985. 64. 9. P. 1–7.
- Smith E. A., Mayfield C. J.* Effects of nitrogen dioxide on selected soil processes // *Water, Air, Soil Pollut.* 1978. V. 9. P. 33–34.
- Svenson S.* Att gödsla skog // *Västerbotten.* 1966. 39. 2. P. 53–55.
- Tamm C. O.* Losses of plant nutrient and other adverse effects of full-tree logging // *Par. for Eimia.* 1975.
- Tamm C. O.* Näjligheterne aff ökaskogs värten genom markförbättrande atgärder // *Svenska skodsvardsforeningens tidskrift.* 1962. 60. 2, P. 167–179.
- Tamm C. O.* Some experiences from forest fertilization trials in Sweden // *Silva Fennica.* 1966. 117. P. 1–24.
- Tamm C. O.* Studies on nitrogen mobilisation in forest soils // *Studia forest swe.* 1969. 75. 39 p.
- Tamm C. O., Nilsson A., Wiklander G.* The optimum nutrition experiment Lisselbo. A brief description of an experiment in a young stand of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) // *Rapp och Uppsats. Inst. vahtekol och marklare. Skogshogsk.* 1974. 18. 25 p.
- Tyler G.* Heavy metals pollution and mineralisation of nitrogen in forest soils // *Nature.* 1975. V. 255. 5511. P. 701–702.
- Viro P. J.* Die Walddüngung auf finnischen Mineralboden // *Folia forest.* 1972. P. 138–199.
- Viro P. J.* Forest manuring on mineral soils // *Medd. Norske skogforsøksvesen.* 1967. 23. 85. P. 111–136.
- Viro P. J.* Forest site evolution in Lapland // *Metsäntutkimuslaitoksen julk.* 1962. T. 55, N 9. P. 1–14.
- Wainwright M.* Effect of exposure to atmospheric pollution on microbial activity in soil // *Plant Soil.* 1980. V. 55. P. 199–204.
- Wainwright M., Killham K.* Microbial transformations of some particular pollution deposits in soils – a source of plant-available nitrogen and sulfur // *Plant Soil.* 1982. V. 65. P. 297–301.
- Walter H.* Vegetation of the Earth and Ecological Systems of the Geobiosphere. 2<sup>nd</sup> edn. Springer-Verlag, New York, 1979. 318 p.
- Wehrmann I.* Die Beurteilung der stickstoffernahrung von Fichten und Kiefernbeständen // *Allgem. Forstzeitschrift.* 1963. 32–33. S. 502–504.
- Wehrmann I.* Metodische Untersuchungen zur Durckführung von Nadelanalösen in Kiefernbeständen // *Forstwiss. Cbl.* 1959. Bd. 78. H. 3/4.
- Wilson D. O.* Nitrification in three soils amended with zinc sulphate // *Soil Biol. Biochem.* 1977. V. 9. 4. P. 277–280.
- Wittich W.* Bodenkundliche und pflanrenplysiologische Grundlagen der mineralischen Düngung im Wald und Möglichkeiten für die Ermittlung den Nährstoffbedarftes // *Allgem. Forstzeitschrift.* 1958. 13. 10. P. 95–101.
- Wright R. F.* Effect of increased carbon dioxide and temperature on runoff chemistry at a forested catchment in southern Norway (CLIMEX project) // *Ecosystems* 1, 1998. P. 216–225.



## СОДЕРЖАНИЕ

Введение .....	5
Глава 1. Роль соединений углерода и азота в формировании продуктивности лесных биогеоценозов .....	7
1.1. Поступление соединений углерода и азота в биогеоценозы ....	7
1.2. Превращение соединений углерода и азота в лесных насаждениях .....	9
1.3. Трансформация соединений углерода и азота в лесных почвах ...	12
1.4. Влияние лесохозяйственных мероприятий на трансформацию соединений азота в почве .....	15
Глава 2. Условия формирования почв и почвенного покрова Восточной Фенноскандии .....	20
2.1. Климат .....	20
2.2. Геология и почвообразующие породы .....	21
2.3. Рельеф .....	23
2.4. Растительность .....	23
Глава 3. Почвы и почвенный покров региона исследования .....	26
3.1. Особенности почвенного покрова региона .....	26
3.2. Почвы сосновых лесов .....	27
3.3. Почвы еловых лесов .....	44
Глава 4. Запасы органического вещества и азота в лесных биогеоценозах .....	52
4.1. Запасы органического вещества и азота в фитомассе сосновых и еловых лесов .....	52
4.2. Запасы углерода и азота в почвах .....	59
Глава 5. Состав органического вещества почв .....	75
5.1. Роль почвенной фауны и микробиоты в трансформации органического вещества почв .....	75
5.2. Биохимический состав лесных почв .....	82
5.3. Групповой и фракционный состав органического вещества почв .....	88
Глава 6. Азотные соединения в лесных почвах (статика и динамика) ...	91
6.1. Состав азотного фонда лесных почв .....	91
6.2. Пространственная и временная изменчивость соединений азота в почвах .....	107
6.3. Аммонифицирующая и нитрифицирующая способность почв .....	121
Глава 7. Биологический круговорот соединений углерода и азота в лесных биогеоценозах .....	126

7.1. Динамика соединений углерода и азота в системе растение – почва . . . . .	126
7.2. Концептуально-балансовые модели круговорота азота в лесных биогеоценозах . . . . .	133
7.3. Статистические модели продуктивности лесных почв . . . . .	155
Глава 8. Влияние антропогенных факторов на лесные почвы . . . . .	164
8.1. Воздействие рубок различной интенсивности . . . . .	164
8.2. Применение минеральных удобрений . . . . .	177
8.3. Изменение свойств лесных почв в процессе сельскохозяйственного использования . . . . .	195
8.4. Влияние азротехногенного загрязнения . . . . .	199
Заключение . . . . .	211
Conclusion . . . . .	215
Литература . . . . .	219

# CONTENTS

Introduction .....	5
Chapter 1. Role of carbon and nitrogen compounds in the formation of the forest biogeocenosis productivity .....	7
1.1. Influx of carbon and nitrogen compounds to forest biogeocenoses ...	7
1.2. Transformations of carbon and nitrogen compounds in tree stands ...	9
1.3. Transformations of carbon and nitrogen compounds in forest soils ...	12
1.4. Silvicultural effects on the transformations of nitrogen compounds in the soil .....	15
Chapter 2. Soil and soil cover formation conditions in East Fennoscandia ...	20
2.1. Climate .....	20
2.2. Geology and parent rocks .....	21
2.3. Topography .....	23
2.4. Vegetation .....	23
Chapter 3. Soils and soil cover in the study area .....	26
3.1. Regional characteristics of the soil cover .....	26
3.2. Soils under pine forests .....	27
3.3. Soils under spruce forests .....	44
Chapter 4. Organic matter and nitrogen stores in forest biogeocenoses .....	52
4.1. Organic matter and nitrogen stores in the plant biomass of pine and spruce forests .....	52
4.2. Organic matter and nitrogen stores in soils .....	59
Chapter 5. Soil organic matter composition .....	75
5.1. Role of the soil fauna and microbiota in the soil organic matter transformations .....	75
5.2. Biochemical composition of forest soils .....	82
5.3. Soil organic matter groups and fractions .....	88
Chapter 6. Nitrogen compounds in forest soils (static and dynamic characteristics) .....	91
6.1. Composition of the nitrogen pool in forest soils .....	91
6.2. Spatial and temporal variability of nitrogen compounds in soils .....	107
6.3. Ammonification and nitrification capacities of soils .....	121
Chapter 7. Biological cycle of carbon and nitrogen compounds in forest biogeocenoses .....	126
7.1. Dynamics of carbon and nitrogen compounds in the plant — soil system .....	126

---

7.2. Conceptual balance models of the nitrogen cycle in forest biogeocenoses .....	133
7.3. Statistical models of the forest soil productivity .....	155
Chapter 8. Anthropogenic impacts on forest soils .....	164
8.1. Effects of cuttings of various intensity .....	164
8.2. Application of mineral fertilizers .....	177
8.3. Agriculture-induced modifications in forest soil properties .....	195
8.4. Effect of air-borne industrial pollution .....	199
Conclusion .....	215
References .....	219

Научное издание

Наталья Глебовна Федорец  
Ольга Николаевна Бахмет

**ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ТРАНСФОРМАЦИИ  
СОЕДИНЕНИЙ УГЛЕРОДА И АЗОТА В ЛЕСНЫХ ПОЧВАХ**

*Печатается по решению Ученого совета  
Института леса КарНЦ РАН*

Редактор *Л. В. Кабанова*  
Оригинал-макет *Т. Н. Люрина*

Серия ИД. Изд. лиц. № 00041 от 30.08.99 г. Сдано в печать 16.09.2003 г.  
Формат 60×84<sup>1</sup>/<sub>16</sub>. Бумага офсетная UNION PRINT S. Гарнитура NewtonCTT.  
Печать офсетная. Уч.-изд. л. 14,4+2,0. Усл. печ. л. 14,0+1,9. Тираж 300 экз.  
Изд. № 9. Заказ № 359.

Карельский научный центр РАН  
Редакционно-издательский отдел  
Петрозаводск, пр. А. Невского, 50

